



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**OPTIMALIZACE NEUTRONOVÉHO SPEKTRA  
PODKRITICKÉHO JADERNÉHO REAKTORU SE  
SPALAČNÍM ZDROJEM**

NEUTRON SPECTRA OPTIMISATION OF SUBCRITICAL NUCLEAR REACTOR WITH SPALLATION  
NEUTRON SOURCE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Vendula Filová**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. Karel Katovský, Ph.D.**

**BRNO 2019**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

**Studentka:** Vendula Filová

**ID:** 184200

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2018/19

## NÁZEV TÉMATU:

### **Optimalizace neutronového spektra podkritického jaderného reaktoru se spalačným zdrojem**

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Aktualizujte dostupné rešerše ADSS k aktuálnímu datu.
2. Vytvořte model soustavy uranového blanketu BURAN s proměnným spalačným a kombinovaným terčem.
3. Proveďte optimalizační výpočty s ohledem na různé materiály těžkého terče (Pb, Bi, Ta, W, Th, U), lehkého terče (Li, Be, B, B<sub>4</sub>C, FLIBE) na rozměry válcových terčů (délka, průměr, mezikruží).
4. Výsledky statisticky zpracujte a graficky reprezentujte.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

1. Paul Reuss: Neutron Physics, EDP SCIENCES, 2008
2. Studentské práce v oblasti ADSS (Zeman, Svoboda, Šťastný, Závorka, a další)
3. IAEA ADS Status reports
4. Materiály z konferencí AccApp, ADS workshopů a seminářů

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 27.5.2019

**Vedoucí práce:** Ing. Karel Katovský, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
předseda oborové rady

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

FILOVÁ, Vendula. *Optimalizace neutronového spektra podkritického jaderného reaktoru se spalačným zdrojem*. Brno, 2019. 93 s. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119143>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Karel Katovský.

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Optimalizace neutronového spektra podkritického jaderného reaktoru se spalačným zdrojem jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **27. května 2019**

.....  
Vendula Filová, podpis

Tímto bych ráda poděkovala svému vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Karlovi Katovskému, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady, panu Ing. Ondřeji Šťastnému za výchozí vstupní soubor pro výpočty v MCNP a svým blízkým za podporu během studia.



## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá urychlovačem řízenými systémy a principy jejich fungování. Teoretická část zahrnuje popis základních součástí systému a představení jednotlivých projektů spojených s výzkumem v oblasti ADS. Praktická část práce se věnuje optimalizaci neutronového spektra v zařízení BURAN změnou materiálu spalačního terče, a to prostřednictvím výpočtů v programu MCNP.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** ADS; ADTT; BURAN; MCNP; spalační reakce; terč; urychlovačem řízený systém

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis deals with accelerator-driven systems and principles of their functioning. The theoretical part includes the description of system components and it also introduces projects related to ADS research. The practical part of the thesis is devoted to neutron spectra optimization for BURAN assembly by change of material of the spallation target in MCNP.

**KEY WORDS:** ADS; ADTT; BURAN; MCNP; spallation reaction; target; accelerator-driven system

# OBSAH

<b>OBSAH.....</b>	<b>7</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>12</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>13</b>
<b>1. ÚVOD.....</b>	<b>18</b>
<b>2. PRINCIP ADS .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1 SPALAČNÍ REAKCE .....</b>	<b>19</b>
2.1.1 VNITROJADERNÁ KASKÁDA.....	19
2.1.2 PŘEDROVNOVÁŽNÁ EMISE.....	20
2.1.3 DEEXCITACE .....	20
2.1.4 MEZIJADERNÁ KASKÁDA .....	20
2.1.5 PRODUKTY SPALAČNÍ REAKCE .....	20
<b>2.2 URYCHLOVAČ.....</b>	<b>21</b>
<b>2.3 SPALAČNÍ TERČ.....</b>	<b>21</b>
<b>2.4 AKTIVNÍ ZÓNA.....</b>	<b>21</b>
2.4.1 PALIVO.....	24
<b>3. VÝZKUM ADS VE SVĚTĚ.....</b>	<b>25</b>
<b>3.1 PROJEKTY V EVROPĚ.....</b>	<b>25</b>
<b>3.2 PROJEKTY V AMERICE .....</b>	<b>36</b>
<b>3.3 PROJEKTY V ASII .....</b>	<b>37</b>
<b>4. PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>41</b>
<b>4.1 BURAN.....</b>	<b>41</b>
<b>4.2 MONTE CARLO N-PARTICLE CODE.....</b>	<b>42</b>
4.2.1 CMESH .....	43
4.2.2 TALLY F4 .....	44
<b>4.3 TĚŽKÉ TERČE .....</b>	<b>45</b>
<b>4.4 LEHKÉ TERČE.....</b>	<b>46</b>
<b>4.5 KOMBINOVANÉ TERČE.....</b>	<b>46</b>
4.5.1 KOMBINACE B/U 1:1.....	46
4.5.2 KOMBINACE U/B 1:1.....	47
4.5.3 KOMBINACE B/U 5/1.....	47
4.5.4 DIBORID URANU .....	47
<b>4.6 POROVNÁNÍ .....</b>	<b>47</b>
<b>5. ZÁVĚR.....</b>	<b>49</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>51</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>61</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Možný koncept ADS [4].</i>	18
<i>Obr. 2 Průběh spalační reakce [6].</i>	19
<i>Obr. 3 Fotografie terče GAMMA-2 [19].</i>	26
<i>Obr. 4 Zařízení SING [21].</i>	27
<i>Obr. 5 Zdroj protonů TRIPS [26].</i>	27
<i>Obr. 6 Fotografie terče EZHIK [30].</i>	28
<i>Obr. 7 Zařízení MUSE [25].</i>	29
<i>Obr. 8 Spalační terč experimentu MEGAPIE před instalací [40].</i>	30
<i>Obr. 9 Model zařízení XT-ADS [46].</i>	31
<i>Obr. 10 Zařízení YALINA, kde (1) je urychlovač, (2) spalační terč, (3) podkritický reaktor a (4) gamma spektrometr [48].</i>	32
<i>Obr. 11 Terč QUINTA. (a) fotografie terče, (b) 3D návrh s průhledným předním plátem pro znázornění rozložení uranových tyčí [56].</i>	34
<i>Obr. 12 Průřez zařízením ESS [61].</i>	35
<i>Obr. 13 Model zařízení MYRRHA-FASTEF [46] a 3D simulace budov, ve kterých bude zařízení situováno [64].</i>	35
<i>Obr. 14 Fotografie terče zařízení SNS [69].</i>	36
<i>Obr. 15 Návrh zařízení GEM*STAR [73].</i>	37
<i>Obr. 16 Fotografie z průběhu instalace zařízení Venus-1 [78].</i>	38
<i>Obr. 17 Princip spalačního terče s granulemi wolframu pro CIADS [81].</i>	39
<i>Obr. 18 Ilustrace rozložení TEF zařízení [83].</i>	39
<i>Obr. 19 Experiment BRAHMMA s vyznačením umístění měřicích kanálů [84].</i>	40
<i>Obr. 20 3D model zařízení BURAN [88].</i>	41
<i>Obr. 21 Model zařízení BURAN v řezu při pohledu z boku (vlevo) a zepředu (vpravo). Uranový válec (tmavě šedá) s terčem (červená) ve svém středu je obklopen vrstvou oceli (zelená). Měřicí kanály jsou vyplněny vzduchem (světle modrá) a nacházejí se v nich detektory z bismutu (tmavě modrá).</i>	42
<i>Obr. 22 Účinné průřezy pro štěpení <math>^{238}\text{U}</math> a reakce <math>(n, 3n)</math> na <math>^{232}\text{Th}</math> a <math>^{238}\text{U}</math>. [91]</i>	43
<i>Obr. 23 Skupiny buněk v tallies F4. Měření úniku (modrá) a detektory v kanálech vzdálených 14 cm (červená), 30 cm (žlutá) a 52 cm (zelená) od osy válce.</i>	44
<i>Obr. 24 a) – g) Hustota neutronového toku v celém neutronovém spektru při použití různých těžkých terčů.</i>	62
<i>Obr. 25 a) – g) Hustota neutronového toku pro energie 0-7 MeV při použití různých těžkých terčů.</i>	63

Obr. 26 a) – g) Hustota neutronového toku pro energie 7-15 MeV při použití různých těžkých terčů.....	64
Obr. 27 a) – g) Hustota neutronového toku pro energie 15-25 MeV při použití různých těžkých terčů.....	65
Obr. 28 a) – q) Hustota neutronového toku pro energie 25-700 MeV při použití různých těžkých terčů.....	66
Obr. 29 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 14 cm od osy zařízení pro jednotlivé materiály těžkých terčů.....	67
Obr. 30 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 30 cm od osy zařízení pro jednotlivé materiály těžkých terčů.....	67
Obr. 31 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 52 cm od osy zařízení pro jednotlivé materiály těžkých terčů.....	68
Obr. 32 Střední hustota neutronového toku na obvodu zařízení pro jednotlivé materiály těžkých terčů.....	68
Obr. 33 a) – e) Hustota neutronového toku v celém neutronovém spektru při použití různých lehkých terčů.....	69
Obr. 34 a) – e) Hustota neutronového toku pro energie 0-7 MeV spektru při použití různých lehkých terčů.....	70
Obr. 35 a) – e) Hustota neutronového toku pro energie 7-15 MeV spektru při použití různých lehkých terčů.....	71
Obr. 36 a) – e) Hustota neutronového toku pro energie 15-25 MeV spektru při použití různých lehkých terčů.....	72
Obr. 37 a) – e) Hustota neutronového toku pro energie 25-700 MeV spektru při použití různých lehkých terčů.....	73
Obr. 38 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 14 cm od osy zařízení pro jednotlivé materiály lehkých terčů.....	74
Obr. 39 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 30 cm od osy zařízení pro jednotlivé materiály lehkých terčů.....	74
Obr. 40 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 52 cm od osy zařízení pro jednotlivé materiály lehkých terčů.....	75
Obr. 41 Střední hustota neutronového toku na obvodu zařízení pro jednotlivé materiály lehkých terčů.....	75
Obr. 42 a) – e) Hustota neutronového toku v celém neutronovém spektru při použití kombinace B/U s různou tloušťkou válců.....	76
Obr. 43 a) – e) Hustota neutronového toku pro energie 0-7 MeV při použití kombinace B/U s různou tloušťkou válců.....	77
Obr. 44 a) – e) Hustota neutronového toku pro energie 7-15 MeV při použití kombinace B/U s různou tloušťkou válců.....	78

Obr. 45 a) – e) Hustota neutronového toku pro energie 15-25 MeV při použití kombinace B/U s různou tloušťkou válců.....	79
Obr. 46 a) – b) Hustota neutronového toku pro energie 25-700 MeV při použití kombinace B/U s různou tloušťkou válců.....	80
Obr. 47 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 14 cm od osy zařízení pro kombinované B/U terče s různou tloušťkou válců.....	81
Obr. 48 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 30 od osy zařízení pro kombinované B/U terče s různou tloušťkou válců.....	81
Obr. 49 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 52 cm od osy zařízení pro kombinované B/U terče s různou tloušťkou válců.....	82
Obr. 50 Střední hustota neutronového toku na obvodu zařízení pro kombinované B/U terče s různou tloušťkou válců. ....	82
Obr. 51 a) – e) Hustota neutronového toku v celém neutronovém spektru při použití kombinace U/B s různou tloušťkou válců. ....	83
Obr. 52 a) – e) Hustota neutronového toku pro energie 0-7 MeV při použití kombinace U/B s různou tloušťkou válců.....	84
Obr. 53 a) – e) Hustota neutronového toku pro energie 7-15 MeV při použití kombinace U/B s různou tloušťkou válců.....	85
Obr. 54 a) – e) Hustota neutronového toku pro energie 15-25 MeV při použití kombinace U/B s různou tloušťkou válců.....	86
Obr. 55 a) – e) Hustota neutronového toku pro energie 25-700 MeV při použití kombinace U/B s různou tloušťkou válců.....	87
Obr. 56 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 14 cm od osy zařízení pro kombinované U/B terče s různou tloušťkou válců.....	88
Obr. 57 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 30 cm od osy zařízení pro kombinované U/B terče s různou tloušťkou válců.....	88
Obr. 58 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 52 od osy zařízení pro kombinované U/B terče s různou tloušťkou válců.....	89
Obr. 59 Střední hustota neutronového toku na obvodu zařízení pro kombinované U/B terče s různou tloušťkou válců. ....	89
Obr. 60 a) – e) Hustota neutronového toku pro různé intervaly energií při použití kombinovaného terče B/U 5/1. ....	90
Obr. 61 a) – e) Hustota neutronového toku pro různé intervaly energií při použití kombinovaného terče UB <sub>2</sub> . ....	91
Obr. 62 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 14 cm od osy zařízení pro vybrané terče. ....	92
Obr. 63 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 30 cm od osy zařízení pro vybrané terče. ....	92

---

<i>Obr. 64 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 52 cm od osy zařízení pro vybrané terče. ....</i>	<i>93</i>
<i>Obr. 65 Střední hustota neutronového toku na obvodu zařízení pro vybrané terče. ....</i>	<i>93</i>

**SEZNAM TABULEK**

*Tab. 1 Hustota materiálů těžkých terčů.....45*

*Tab. 2 Hustota materiálů lehkých terčů. ....46*



## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$k_{\infty}$	multiplikační koeficient	(–)
$k_{ef}$	efektivní multiplikační koeficient	(–)
$n$	počet částic v jednotce objemu	(–)
$n_{chain}$	neutronový výtěžek	(–)
$\mathbf{r}$	polohový vektor	(m)
$t$	čas	(s)
$v$	rychlost	(ms <sup>-1</sup> )
$N$	počet neutronů	(–)
$E$	energie	(eV)
$G$	energetický zisk	(eV)
$V$	objem	(m <sup>3</sup> )
$\eta$	počet neutronů uvolněných v důsledku zachytu neutronu na štěpném jádře	(–)
$\rho$	reaktivita	(–)
$\sigma$	mikroskopický účinný průřez	(m <sup>2</sup> )
$\nu$	počet neutronů uvolněných při štěpení	(–)
$\Sigma$	makroskopický účinný průřez	(m <sup>2</sup> )
$\phi$	hustota neutronového toku	(m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )

ABC	Accelerator-Based Conversion
ADANES	Accelerator-Driven Advanced Nuclear Energy System
ADEP	Accelerator Driven Energy Production
ADONIS	Accelerator Driven Optimized Nuclear Irradiation System
ADOPT	Advanced Options for Partitioning and Transmutation
ADS	Accelerator Driven System
ADTR	Accelerator-Driven Thorium Reactor
ADTT	Accelerator-Driven Transmutation Technology
AFTRA	Advanced Fuels for Transmutation Systems
ALADIN	A Large Acceptance Dipole Magnet
ANL	Argonne National Laboratory
ASCHLIM	Assessment of Computational Fluid Dynamics Codes for Heavy Liquid Metals

---

ATW	Accelerator Transmutation of Waste
BARC	Bhabha Atomic Research Centre
BNL	Brookhaven National Laboratory
BRAHMMA	BeO Reflected and HDPe Moderated Multiplying Assembly
BURAN	Big Uranium Assembly
CANDIDE	Coordination Action on Nuclear Data for Industrial Development in Europe
CANDU	Canada Deuterium Uranium
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique
CERN	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
CIADS	Chinese Initiative Accelerator Driven System
CONFIRM	Collaboration On Nitride Fuel Irradiation and Modelling
CSNS	China Spallation Neutron Source
ČVUT	České Vysoké Učení Technické
DEMETRA	Development and Assessment of Structural Materials and Heavy Liquid Metal Technologies for Transmutation Systems
E+T	Energy plus Transmutation
E&T RAW	Energy and Transmutation of Radioactive Wastes
EA	Energy Amplifier
ECATS	Experimental Activities on the Coupling of an Accelerator, a Spallation Target and a Sub-critical Blanket
EFIT	European Facility for Industrial Transmutation
EFNUDAT	European Facilities for Nuclear Data Measurements
EITF	Electron Irradiation Test Facility
ENEA	National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development
ENNG	Electro-Nuclear Neutron Generator
ESS	European Spallation Source
ETA	Engineering Test Accelerator
EU	Evropská Unie
EURATOM	Evropské Společenství pro Atomovou Energii
EURISOL	European Isotope Separation On-Line
EUROTRANS	European Research Programme for the Transmutation of High Level Nuclear Waste in an Accelerator Driven System

---

FAIRFUELS	Fabrication, Irradiation and Reprocessing of Fuels and Targets for Transmutation
FEAT	First Energy Amplifier Test
FFAG	Fixed Field Alternating Gradient
FP	Framework Programmes
FR	Fast Reactor
FRS	Fragment Separator
FZ	Forschungszentrum
GELINA	Geel Electron Linear Accelerator Facility
GEM*STAR	Green Energy Multiplier Subcritical Technology for Alternative Reactors
GENEPI	Generateur de Neutrons Pulsé Intense
GETMAT	Generation IV and Transmutation Materials
GSI	Gesellschaft für Schwerionenforschung
GUINEVERE	Generator of Uninterrupted Intense Neutrons at the Lead Venus Reactor
HFR	High Flux Reactor
HINDAS	High and Intermediate Energy Nuclear Data for Accelerator-Driven Systems
HLM	Heavy Liquid Metals
HYPER	Hybrid Power Extraction Reactor
INC	Intra-Nuclear Cascade
INR	Institute for Nuclear Research
IREN	Intense Resonance Neutron Source
IRMM	Institute for Reference Materials and Measurements
ISU	Idaho State University
ITEP	Institute of Theoretical and Experimental
J-PARC	Japan Proton Accelerator Research Complex
JAERI	Japan Atomic Energy Research Institut
JINR	Joint Institute for Nuclear Research
KAERI	Korea Atomic Energy Research Institute
KART	Kumatori Accelerator-Driven Reactor Test Facility
KIPT	Kharkov Institute of Physics and Technology
KIT	Karlsruhe Intitute of Technology

---

KUCA	Kyoto University Critical Assembly
KURRI	Kyoto University Research Reactor Institute
KVI	Kernfysisch Versneller Instituut
LANL	Los Alamos National Laboratory
LBNL	Lawrence Berkeley National Laboratory
LEU	Low Enriched Uranium
LFR	Lead-Cooled Fast Reactor
LLFP	Long-Lived Fission Products
LWR	Light Water Reactor
MA	Minoritní Aktinidy
MASURCA	Maquette Surgénératrice Caradache
MCNP	Monte Carlo N-Particle Code
MEGAPIE	Megawatt Pilot Experiment
MOX	Mixed Oxide Fuel
MTA	Materials Testing Accelerator
MUSE	Multiplication avec Source Externe
MYRRHA	Multipurpose Hybrid Research Reactor for High-tech Applications
MYRRHA-FASTEF	Multipurpose Hybrid Research Reactor for High-tech Applications Fast-Spectrum Transmutation Experimental Facility
n_TOF	Neutron Time-of-Flight Facility
NUDATRA	Nuclear Data for Transmutation
OMEGA	Options for Making Extra Gains from Actinides and Fission Products
ORNL	Oak Ridge National Laboratory
P&T	Partitioning and Transmutation
PDS-XADS	Preliminary Design Studies of an Experimental Accelerator-Driven System
PS	Proton Synchrotron
PSI	Paul Scherrer Institute
PWR	Pressurized Water Reactor
R&D	Research and Developement
RACE	Reactor-Accelerator Coupling Experiments
SCANDAL	Scattered Nucleon Detection Assembly
SCK•CEN	Studiecentrum voor Kernenergie•Centre d'Étude de l'Énergie Nucléaire

---

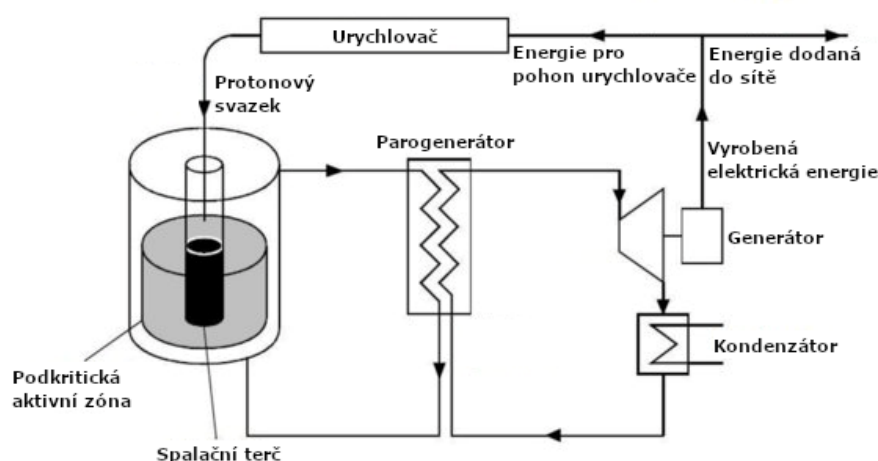
SINQ	Swiss Spallation Neutron Source
SNS	Spallation Neutron Source
SPALADIN	Spallation Based on a Large Acceptance Dipole Magnet
SPIRE	Spallation and Irradiation Effects
SSSR	Svaz sovětských socialistických republik
TAC	Turkic Accelerator Complex
TARC	Transmutation by Adiabatic Resonance Crossing
TECLA	Technologies, Materials and Thermal-Hydraulics for Lead Alloys
TEF	Transmutation Experimental Facility
TEF-P	Transmutation Physics Experimental Facility
TEF-T	Target Test Facility
TIARA	Test Infrastructure and Accelerator Research Area
TMIF	Test Material Irradiation Facility
TPC	Time Projection Chamber
TRADE	Triga Accelerator Driven Experiment
TRASCO	Transmutazione Scorie
TRIGA	Training, Research, Isotopes, General Atomics
TRIPS	Transmutazione Scorie Intense Proton Source
TSL	The Svedberg Laboratory
UCL	Université catholique de Louvain
USA	United States of America
UT	University of Texas
UU	Uppsala University
ÚJF	Ústav Jaderné Fyziky
WP	Working Packages
XT-ADS	Experimental Facility Demonstrating the Technical Feasibility of Transmutation in an Accelerator Driven System

# 1. ÚVOD

Spotřeba elektrické energie ve světě neustále roste, s čímž souvisí potřeba rozšiřování jejích zdrojů. Zároveň, z důvodu snahy omezit produkci oxidu uhličitýho a dalších skleníkových plynů, je současným trendem omezení výroby energie v uhelných elektrárnách. Alternativou k nim by mohly být jak obnovitelné zdroje energie, tak jaderné elektrárny. Na světě je v současné době v provozu 451 průmyslově využívaných jaderných reaktorů, dalších 56 je ve výstavbě a stavba 148 je naplánována. Mimo to je v provozu dalších 225 výzkumných reaktorů.<sup>1</sup> [1]

Jaderné reaktory jsou zdrojem velkého množství radioaktivních odpadů, se kterými se v současné době nakládá podle dvou scénářů. Prvním je otevřený palivový cyklus, kdy je vyhořelé palivo uloženo do hlubinného úložiště. Tato varianta je méně nákladná, většina uranu v palivu však zůstane nevyužita. Druhým je uzavřený palivový cyklus, během něhož jsou z vyhořelého jaderného paliva extrahovány uran a plutonium, které lze následně využít při výrobě paliva MOX (Mixed Oxide Fuel). Aktinoidy a štěpné produkty jsou pak uloženy do hlubinného úložiště. Je tak vyřešena problematika využití paliva a zároveň se sníží objem uloženého odpadu. [2]

Jak uzavřený, tak otevřený cyklus ale neřeší problém radiotoxicity minoritních aktinoidů (MA) a dlouhožijících štěpných produktů (LLFP z angl. long-lived fission products), obsažených ve vyhořelém palivu. Z toho důvodu mnoho zemí pracuje na výzkumu nových možností nakládání s vyhořelým palivem v rámci takzvaného double strata cyklu. V něm je palivový cyklus rozdělen do dvou „vrstev“, kdy v první dochází i k několikanásobné recyklaci uranu a plutonia, ve druhé pak k oddělení a transmutaci LLFP a MA. V double strata cyklu by v budoucnu mohly hrát důležitou roli urychlovačem řízené systémy (ADS z angl. Accelerator Driven System), kterými se bude zabývat tato práce. Jedná se o zařízení složené z urychlovače částic o velkém výkonu, který ostřeluje spalační terč, čímž dochází k produkci neutronů, které unikají do podkritické aktivní zóny obklopující terč. Takovýto jaderný reaktor je zároveň schopen vyrábět elektřinu, transmutovat izotopy přítomné v radioaktivních odpadech (výše zmíněné MA a LLFP) a vytvářet štěpný materiál ozařováním štěpitelných izotopů. Zjednodušené schéma možného konceptu ADS je znázorněno na Obr. 1 [4]. [3]



Obr. 1 Možný koncept ADS [4].

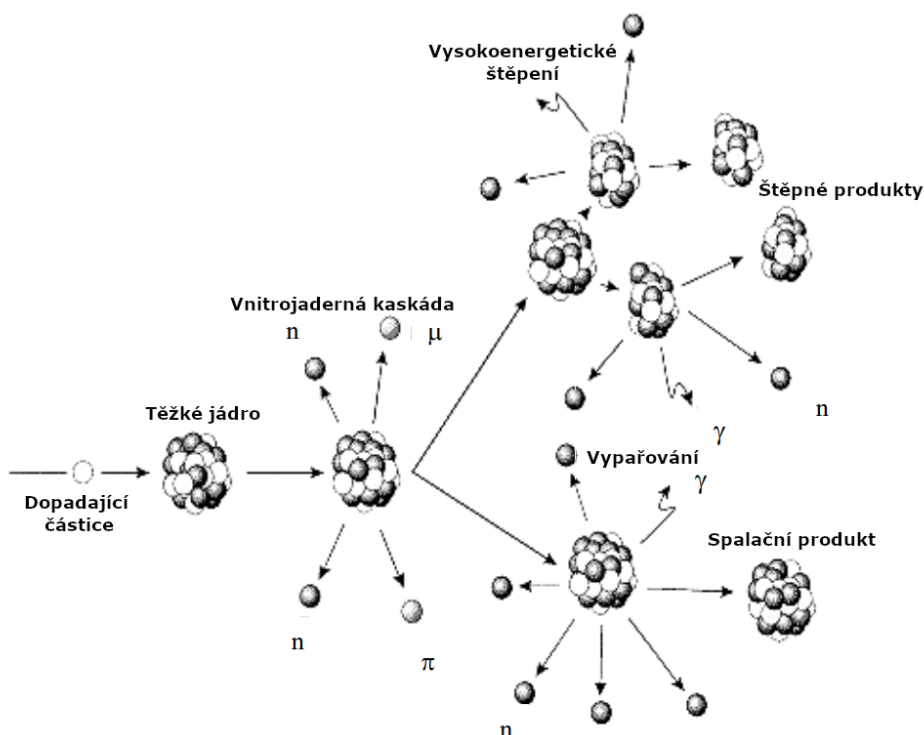
<sup>1</sup> Data získaná k 1.1.2019.

## 2. PRINCIP ADS

Jak bylo zmíněno výše, ADS se skládají z urychlovače částic (nejčastěji protonů), ostřelujících terč, umístěný v aktivní zóně podkritického reaktoru. Následující kapitoly se věnují popisu principu fungování neutronového zdroje, tedy spojení urychlovače s terčem, následuje představení jednotlivých komponent ADS a fungování podkritického jaderného reaktoru.

### 2.1 Spalační reakce

Informace pro následující kapitoly byly čerpány ze zdroje [5]. Spalační (tříštivá) reakce je typ jaderné reakce, při které částice (případně lehké jádro) s kinetickou energií několik stovek MeV až několik GeV interaguje s jádrem těžkého prvku, následkem čehož dojde k emisi velkého množství hadronů, zejména neutronů<sup>2</sup>, nebo odštěpků. Výhoda spalačních reakcí tkví v tom, že je díky nim možné dosáhnout mnohem vyšší hustoty toku neutronů, než jaké je dosaženo v klasických reaktorech. Vyšší hustota neutronového toku je nutná pro transmutaci MA a LLFP. Průběh spalační reakce je znázorněn na Obr. 2 [6]. Celý proces se skládá z následujících fází.



Obr. 2 Průběh spalační reakce [6].

#### 2.1.1 Vnitrojaderná kaskáda

Vnitrojaderná kaskáda (anglicky intra-nuclear cascade, zkr. INC) nastává v čase asi  $10^{-22}$  s. Proton s vysokou energií (přibližně 1 GeV) při srážce interaguje s jednotlivými částicemi jádra terče, nedochází tedy k vytvoření složeného jádra. Jedná se o pružnou srážku, při které proton předá svoji kinetickou energii nukleonům terče, čímž zahájí kaskádu srážek nukleon-nukleon. Částice, které srážkou získaly dostatečnou energii, opouštějí jádro, a to nejčastěji ve směru pohybu původní

<sup>2</sup> Například na jeden 1,6 GeV proton ostřelující olověný terč připadá přibližně 55 neutronů.

částice. Zbytek energie je rovnoměrně rozložen mezi jednotlivé částice jádra terče, které se dostává do vysoce excitovaného stavu.

### 2.1.2 Předrovnovážná emise

Kdykoli v průběhu reakce může dojít k předrovnovážné emisi, což znamená, že ve chvíli, kdy dojde k interakci původní anebo kaskádní částice s některým nukleonem, může nastat emise částice nebo odštěpku. Energie těchto částic bývají větší než u částic emitovaných během rovnovážného rozpadu.

### 2.1.3 Deexcitace

V čase asi  $10^{-16}$  s je ostřelované jádro v rovnovážném stavu a energie je rovnoměrně rozložena v celém jádře. Začíná fáze rovnovážného rozpadu.

Jádro se zbavuje energie vypařováním neutronů nebo lehkých odštěpků, jako jsou deuterony,  $\alpha$ -částice atd. o energii přibližně 40 MeV. Částice jsou emitovány izotropicky (do všech směrů).

Další možností, jak se jádro zbaví energie, může být jaderné štěpení, emise těžkého odštěpku, rozpad na více lehkých odštěpků nebo na jednotlivé částice.

V případě, že energie jádra není dostatečně velká pro emisi neutronu, může dojít k deexcitaci emisí částice  $\gamma$ . Poté bývá jádro zpravidla  $\beta$ -radioaktivní a rozpadá se, dokud se nedostane do stabilního stavu.

### 2.1.4 Mezijaderná kaskáda

Částice, které opouštějí jádro v důsledku spalačních reakcí mohou způsobit další spalační reakce. Tento jev se nazývá mezijaderná kaskáda. Týká se především neutronů, u kterých nedochází ke ztrátám energie z důvodu ionizace, tudíž pronikají nejlouběji do terče.

### 2.1.5 Produkty spalační reakce

Produkty těchto reakcí se rozdělují do dvou sekcí. Jde o produkty vypařování s těžkými jádry a velkým množstvím protonů, nebo o produkty štěpení s nižší hmotností.

K detekci produktů spalačních reakcí může být využito dvou metod, a sice přímé a inverzní kinematiky.

Z hlediska přímé kinematiky relativistický lehký projektil naráží do těžkého terče, v němž se zastaví. Produkty reakce mohou být detekovány za pomoci  $\gamma$  spektroskopie a hmotnostní spektroskopie. Metoda umožňuje měřit výtěžky z meta-stabilních stavů jader, využívat radioaktivní terče a potřebuje méně času. Na druhou stranu neumožňuje měřit výtěžky z dlouhožijících, stabilních a velmi krátce žijících jader.

Z hlediska inverzní kinematiky relativistické těžké jádro ostřeluje lehký terč a produkty reakce opouštějí terč v přímém směru a při použití přiměřených technologií mohou být identifikovány přímo za letu. Využít se může například magnetického spektrometru FRS (Fragment Separator), sestávajícího ze čtyř dipólových magnetů a detekčního vybavení.



## 2.2 Urychlovač

Jak uvádí například zdroj [7], pro ADS se uvažuje jak využití cyklotronů, tak lineárních urychlovačů. Cyklotrony mohou být menší, jejich problémem ale je, že maximální proud svazku bývá 5-10 mA. V případě lineárních urychlovačů částic je možné dosáhnout proudu v řádu stovek mA, bývají tedy využívány častěji.

Pro maximální neutronový výtěžek je potřeba, aby energie protonů byla asi 1 GeV. Různé koncepty ADS uvažují větší či menší energie svazku, což v kombinaci s různým proudem umožňuje dosáhnout požadovaného výkonu. Co se týče výzkumných zařízení, je požadován výkon 1-2 MW, odpovídající tepelnému výkonu 50-100 MW (závisí na multiplikačním koeficientu reaktoru). Takového výkonu je dosaženo s energiemi svazku v rozmezí 0,5-3 GeV, kdy bývají uvažovány jak spojitě, tak pulsní svazky. Pro průmyslové využití ADS se uvažují spojitě svazky o výkonu desítek MW, kdy získaný tepelný výkon má být v řádu GW. [8]

## 2.3 Spalační terč

Úkolem terče je využít protony dodané urychlovačem k produkci neutronů prostřednictvím spalačních reakcí. Na terč jsou kladeny různé požadavky, musí být spolehlivý za provozu, snadno vyměnitelný, počet neutronů unikajících z terče musí být co největší a zároveň má být schopen pojmout velkou hustotu výkonu, přibližně 1 MW/litr. [8]

Terče se uvažují buď k okénkem, tvořícím přechod mezi terčem a urychlovačem, nebo bez okénka. V případě, že terč okénko obsahuje, je vystaveno náročným podmínkám, jako je rozdíl tlaků, tepelné namáhání, ozařování vysoce energetickými částicemi atd. Pokud jde o bezokénkový terč, přechod mezi terčem a urychlovačem tvoří pouze povrch terče. V tom případě je důležité kontrolovat stav povrchu a odstraňovat těkavé látky pro udržení vakua v urychlovači. [2]

Z přehledu jednotlivých zařízení v kapitole 3 je patrné, že pevné terče nabývají nejrozličnějších podob (válců, tyčí, koulí nebo destiček) a bývají obklopené chladícím médiem. Materiálem terče může být například uran, olovo, tantal, wolfram nebo thorium.

V případě tekutých terčů tekutý kov plní jak roli neutronového zdroje, tak média pro odvod tepla. Jako tekutý terč bývá nejčastěji uvažováno olovo (Pb), případně směs olovo-bismut (Pb-Bi). Nevýhodou olova je vysoká teplota tání (327 °C), jejíž trvalé udržení je technologicky náročné a nákladné. Směs Pb-Bi má teplotu tání 123,5 °C, tedy výrazně nižší, než samotné olovo. Přítomnost bismutu ale vede ke značné produkci radiotoxického a těkavého  $^{210}\text{Po}$ . To je produkováno i olovem, ale ve výrazně nižší míře. Kvůli rozdílným provozním teplotám jsou ale množství uvolněného  $^{210}\text{Po}$  podobné. Jak Pb, tak i směs Pb-Bi způsobuje korozi kovů, jejíž míra roste s rostoucí teplotou. Z výše uvedeného plyne, že výhodnější je využití směsi Pb-Bi. Mimo výše uvedené některé návrhy uvažují jako tekutý terč rtuť [7].

## 2.4 Aktivní zóna

Následující informace vycházejí ze zdroje [7]. Energie v jaderných reaktorech vzniká štěpením jader neutrony a v menší míře také radioaktivním rozpadem. Důležitá veličina pro popis interakce neutronů s jádrem je účinný průřez  $\sigma$  ( $\text{m}^2$ )<sup>3</sup>. Účinný průřez vyjadřuje míru pravděpodobnosti, že bude neutron s jádrem interagovat. Druh interakce pak označuje index: štěpení  $\sigma_F$ , záchyt  $\sigma_C$ ,

<sup>3</sup> Používá se i jednotka barn, která odpovídá  $10^{-28}\text{m}^2$ .

absorpci  $\sigma_A$  ( $\sigma_A = \sigma_F + \sigma_C$ ), pružný  $\sigma_s$  a nepružný  $\sigma_{in}$  rozptyl. Pro sledování vlastností neutronů v makroskopických útvarech, jakými jsou například jaderné reaktory, byla definována veličina makroskopický účinný průřez  $\Sigma$ , která je dána součtem účinných průřezů všech částic v jednotce objemu. Indexy pro jednotlivé interakce se používají stejné jako u mikroskopického účinného průřezu.

Pro tepelné neutrony (s energií v řádu setin eV) má většina nuklidů větší  $\sigma_F$  než pro rychlé neutrony (s energií v řádu stovek keV až desítek MeV).

Pravděpodobnost, že absorpce neutronu povede ke štěpení je

$$\frac{\sigma_F}{\sigma_A} = \frac{1}{1 + \alpha}, \quad (2.1)$$

kde  $\alpha$  je

$$\alpha = \frac{\sigma_C}{\sigma_F}. \quad (2.2)$$

Pro počet neutronů  $\eta$  uvolněných v důsledku zachytu neutronu štěpným jádrem platí

$$\eta = \frac{\nu}{1 + \alpha}, \quad (2.3)$$

kde  $\nu$  je počet neutronů uvolněných na jednu štěpnou reakci.

Jako štěpné (angl. fissile) nuklidy nazýváme ty, u kterých dochází k rozštěpení tepelnými neutrony. Jedná se o těžké prvky s lichým počtem neutronů. Patří mezi ně  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  a  $^{239}\text{Pu}$ .

Naopak nuklidy, které lze rozštěpit jen rychlými neutrony, nazýváme štěpitelné (angl. fertile). Je pro ně typický sudý počet neutronů. Při zachycení tepelného neutronu štěpitelným jádrem může dojít ke vzniku štěpného jádra, zpravidla prostřednictvím  $\beta^-$  rozpadu. Mezi štěpitelné nuklidy patří  $^{232}\text{Th}$  a  $^{238}\text{U}$ .

Pokud uvažujeme nekonečné médium, pak pro multiplikační koeficient platí

$$k_\infty = \frac{\text{počet neutronů v současné generaci}}{\text{počet neutronů v generaci předchozí}}. \quad (2.4)$$

Jinak řečeno, jeden zde vzniklý neutron dá vzniknout dalším  $k_\infty$  neutronům druhé generace, ve třetí generaci vznikne  $k_\infty^2$  atd. Pro  $k_\infty < 1$  je neutronový výtěžek

$$n_{chain} = 1 + k_\infty + k_\infty^2 + \dots + k_\infty^n + \dots = \frac{1}{1 - k_\infty}. \quad (2.5)$$

Pro konečný prostor (například jaderný reaktor) je třeba nahradit  $k_\infty$  efektivní hodnotou  $k_{ef}$ , která je menší než  $k_\infty$ . To je zapříčiněno faktem, že některé neutrony z prostoru unikají. Velikost  $k_{ef}$  závisí na rozměrech reaktoru. Někdy je vhodné uvažovat i hodnoty  $k_s$ , které závisí na poloze neutronu, který řetězovou reakci započal.

Podle efektivní hodnoty multiplikačního koeficientu  $k_{ef}$  rozlišujeme tři stavy reaktoru:

- Nadkritický stav, kdy je  $k_{ef} > 1$  a počet neutronů důsledkem řetězové reakce roste do nekonečna. Nekontrolovaného nadkritického stavu je využito v jaderných zbraních, v jaderných reaktorech jde o nežádoucí jev, vedoucí k jaderné havárii. Kontrolovaného nadkritického stavu se využívá při spouštění jaderného reaktoru.
- Kritický stav, kdy je  $k_{ef} = 1$ , je stav, ve kterém jsou provozovány klasické reaktory. Počet štěpných reakcí v každé generaci zůstává konstantní.
- Podkritický stav, kdy  $k_{ef} < 1$  a počet neutronů vzniklých v důsledku štěpení je podle rovnice (2.5) konečný a řetězová reakce není trvalá. Součástí podkritického reaktoru je proto zdroj neutronů.

Dalším důležitým pojmem je reaktivita, kterou můžeme vyjádřit jako

$$\rho = \frac{k_{ef} - 1}{k_{ef}}. \quad (2.6)$$

V klasickém reaktoru je třeba udržovat reaktivitu rovnu nule, čehož se docílí například použitím regulačních tyčí. Reaktivita podkritického reaktoru je záporná, pokud vzroste, dojde k vypnutí urychlovače a řetězová reakce se zastaví.

Cílem ADS je kromě transmutace MA a LLFP i výroba energie. Proto je vhodné vyjádřit míru toho, jak energie uvolněná při štěpení překračuje energii původní ostřelující částice z urychlovače.

Počet neutronů vzniklých v podkritickém reaktoru je

$$N = \frac{N_0}{1 - k_{ef}}, \quad (2.7)$$

kde  $N_0$  je počet neutronů vznikajících interakcí protonu s materiálem terče, který je obklopený štěpným materiálem, který je charakterizován efektivním multiplikačním koeficientem  $k_{ef}$ .

Počet neutronů druhé generace je

$$N_2 = \frac{k_{ef} N_0}{1 - k_{ef}}. \quad (2.8)$$

Neutrony jsou produktem štěpných reakcí, z nichž z každé vzniká  $\nu$  neutronů. Počet štěpných reakcí druhé generace je tedy

$$N_F = \frac{k_{ef} N_0}{\nu(1 - k_{ef})}. \quad (2.9)$$

Pokud budeme uvažovat, že se při každém štěpení se uvolní asi 0,2 GeV, celkové uvolněné teplo bude

$$Q = \frac{0,2 k_{ef} N_0}{\nu(1 - k_{ef})}. \quad (2.10)$$

Energetický zisk systému zjistíme porovnáním uvolněného tepla s energií protonu  $E_p$ , který způsobil uvolnění prvního neutronu:

$$G = \frac{0,18 k_{ef} N_0}{\nu(1 - k_{ef}) E_p} = \frac{G_0 k_{ef}}{1 - k_{ef}}. \quad (2.11)$$

Experiment FEAT (více v kapitole 3.1) ukázal, že při využití uranového terče, protonového paprsku s energií nad 1 GeV a při  $k_{ef} = 0,9$  je zisk roven 3,3. Výpočty pro projekt EA (viz kapitola 3.1) ukazují, že při využití olověného terče a 1 GeV protonů bude zisk 2,65.

Výkon jaderného reaktoru úzce souvisí s hustotou neutronového toku  $\phi$  ( $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), definovanou podle [9] jako

$$\phi(\mathbf{r}, E, t) = v(E)n(\mathbf{r}, E, t), \quad (2.12)$$

kde  $v$  je vzdálenost, kterou neutron urazí za jednotku času a  $n$  je počet částic v jednotce objemu. Jinak řečeno, hustota neutronového toku je celková dráha, kterou částice urazí v jednotce objemu za jednotkový čas.

### 2.4.1 Palivo

Jako palivo je možné použít vyhořelé jaderné palivo, uran, plutonium, velká pozornost je věnována využití  $^{232}\text{Th}$ . Thorium po zachytu neutronu projde přeměnou na štěpný  $^{233}\text{U}$ , což je výhodné, protože světové zásoby thoria jsou výrazně větší, než zásoby uranu. [1]

Co se týče pevných paliv, zejména oxidů, jejich výhodou je, že se jedná o paliva vyzkoušená a prozkoumaná. Na druhou stranu, kvůli štěpným produktům, vznikajícím v palivu, není neutronový tok zcela optimální. Tekutá paliva sice umožňují průběžné sledování a optimalizaci neutronového toku, nicméně otázka jejich spolehlivosti a bezpečnosti je stále otevřená. [7]

Účelem ADS má kromě výroby energie být i transmutace MA a LLFP. Co se týče MA, ve vyhořelém jaderném palivu jsou zastoupeny především izotopy americia, curia a neptunia. Jde o prvky radiotoxické, s dlouhým poločasem rozpadu a  $\gamma$  zářiče. [10] K transmutaci dochází buď zachytem, nebo štěpením, následně vzniknou izotopy s krátkým poločasem rozpadu nebo izotopy stabilní. Z LLFP se uvažuje transmutace  $^{129}\text{I}$  a  $^{99}\text{Tc}$ , zejména pro jejich velké účinné průřezy pro zachyt neutronu. K jejich transmutaci je vhodné využít rychlé neutrony (s energií 0,5 – 10 MeV). [11]

### 3. VÝZKUM ADS VE SVĚTĚ

Podkladem pro následující odstavce je zdroj [12]. Umělá transmutace prvků má počátek v roce 1919, kdy E. Rutherford ostřeloval atomy dusíku částicemi  $\alpha$  za vzniku kyslíku. Jako zdroj  $\alpha$  částic bylo použito radioaktivní polonium  $^{210}\text{Po}$ .

Roku 1928 byl R. Wideroem sestrojen první lineární urychlovač částic, následovaný E. O. Lawrencovým vynálezem cyklotronu roku 1929. O tři roky později byl J. D. Cockroftem a E. T. S. Waltonem sestrojen urychlovač, založený na principu násobiče napětí. Na stejném principu dodnes fungují zejména injektory částic pro větší urychlovače. V rámci svých experimentů ostřelovali protony terč z Li, což vedlo k produkci He. Šlo o první případ umělé transmutace prvku při využití umělého zdroje částic. Roku 1940 bylo nezávisle na sobě Lawrencem v USA a N. N. Semenovem v SSSR navrženo využít cyklotron jako zdroj neutronů. K realizaci návrhu došlo o rok později v Berkley, kde G. T. Seaborg a jeho tým ostřelováním přírodního uranu deuterony o energii 6 MeV získali první  $\mu\text{g}$  plutonia.

Roku 1950 byl pod vedením Lawrence v World War II Naval Reserve Training Station, dnes známém jako Lawrence Livermore National Laboratory v Kalifornii spuštěn projekt Materials Testing Accelerator (MTA), který měl za cíl získat  $^{239}\text{Pu}$  z ochuzeného uranu. Roku 1952 v Kanadě W. B. Lewis navrhl využít urychlovač k získu  $^{233}\text{U}$  z přírodního thoria jako palivo pro reaktory CANDU (Canada Deuterium Uranium). Ve stejné době byla na území USA objevena bohatá naleziště uranové rudy, a tak se od projektu MTA upustilo.

Lawrence a jeho tým si v 60. letech 20. století patentovali Elektrojaderný reaktor, který měl sloužit k zajištění dostatečných zásob  $^{239}\text{Pu}$  a  $^{233}\text{U}$ , které se na Zemi nevyskytují přirozeně. Stejným tématem se zabývali i v 70. letech V. I. Goldanski a R. G. Vassylkov v SSSR, kteří zkoumali neutronový výtěžek v ochuzeném uranu při experimentech na urychlovači v Dubně. [13]

Výše uvedené výzkumy následovaly práce V. S. Barašenkova a K. D. Tolstova [14], později pak návrhy prvních novodobých ADS zařízení C. Rubii (EA) a Ch. Bowmana (ATW).

Následující kapitoly se věnují představení projektů, zaměřujících se na výzkum ADS.

#### 3.1 Projekty v Evropě

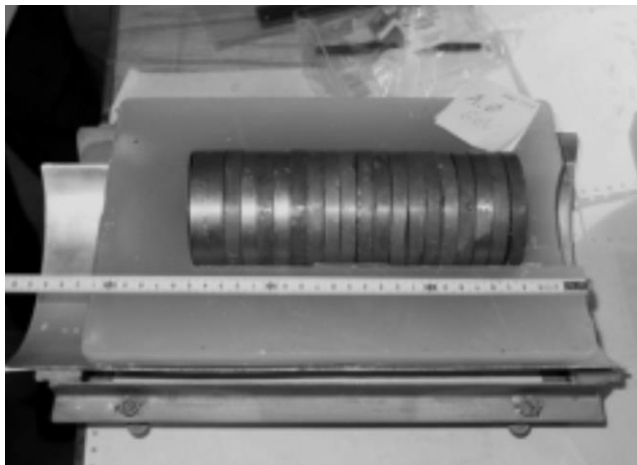
**Energy Amplifier (EA)** [15], také nazývaný **Accelerator Driven Energy Production (ADEP)**, navrhnul Carlo Rubbia v CERNu v roce 1993. Hlavním cílem projektu bylo získat energii za pomoci urychlovačem vyvolané vnitrojaderné kaskády. Dalším cílem bylo využití thoria  $^{232}\text{Th}$  jako paliva k produkci štěpitelného  $^{233}\text{U}$ . Zároveň, díky rychlým neutronům, měl být EA schopný rozštěpit vyšší aktinidy. Šlo o podkritický systém s rychlými neutrony, řízený urychlovačem protonů. Urychlovačem byl 1 GeV Proton Synchrotron (PS). Jako palivo sloužilo přírodní thorium. Jako spalační terč, moderátor a stínění bylo využito olovo.

**First Energy Amplifier Test (FEAT)** [16] byl experiment na EA v CERNu, určený ke zkoumání získu energie v ADS. Zisk je definovaný jako poměr energie vyrobené prostřednictvím ADS a energie dodané paprskem částic (rovnice (2.11)). Experimenty proběhly pro různé energie svazku v intervalu 0,6-2,75 GeV. Bylo mimo jiné dokázáno, že optimální produkce neutronů nastává při energii protonů paprsku větší než 900 MeV.

**Transmutation by Adiabatic Resonance Crossing (TARC)** [17], další z experimentů na EA, měl za cíl ověřit možnost využití adiabatického rezonančního přechodu k likvidaci LLFP

( $^{99}\text{Tc}$  a  $^{129}\text{I}$ ) a zároveň zkoumal šíření spalačních neutronů v olovu. Experiment probíhal s momenty protonů 2,5 GeV/c a 3,5 GeV/c.

**GAMMA-2** [18] byl olověný terč o průměru 8 cm a délce 20 cm, obklopený 6 cm vrstvou parafínu (viz Obr. 3 [19]), na kterém byla, ve spojení se supravodivým synchrotronem Nuclotron, provedena série experimentů v Joint Institute for Nuclear Research (JINR) v ruské Dubně. Energie protonů byla v intervalu od 0,53 GeV do 4,15 GeV. GAMMA-2 umožňoval tři způsoby vložení vzorků pro transmutaci – buď přímo do spalačního terče mezi olověné disky, nebo mezi disky a parafinový moderátor, nebo až za parafinovou vrstvu. Byly zvoleny dva druhy vzorků, a to kombinace  $^{129}\text{I}$  a  $^{237}\text{Np}$ , nebo  $^{139}\text{La}$ .



Obr. 3 Fotografie terče GAMMA-2 [19].

**GAMMA-3** [18] byl další terč, instalovaný v JINR. Tvořil ho olověný válec o průměru 8 cm a délce 60 cm, obklopený 25 grafitovými bloky. Urychlovačem byl opět Nuclotron, tentokrát s paprskem deuterionů o energii 2,33 GeV.

**Accelerator Driven Optimized Nuclear Irradiation System (ADONIS)** [20] byl prvním projektem belgického SCK•CEN (Studiecentrum voor Kernenergie•Centre d'Étude de l'Énergie Nucléaire), sídlícího ve městě Mol. Probíhal v letech 1995-1997 a byl zaměřen na studium spojení urychlovače s terčem a podkritickým reaktorem. Šlo o malé iradiační zařízení, jehož jediným účelem byla produkce  $^{99}\text{Mo}$ . Od roku 1998 bylo navrženo rozšířit účely zařízení pro demonstraci principů ADS. Od tohoto roku je projekt nazýván MYRRHA.

**Multipurpose Hybrid Research Reactor for High-tech Applications (MYRRHA)** [20] je víceúčelové výzkumné zařízení SCK•CEN, schopné pracovat jak v podkritickém, tak v kritickém režimu. Vychází z projektu ADONIS. V roce 2005 se skládalo z urychlovače protonů (5 mA, 350 MeV), ostřelujícího bezokénkový terč. Tepelný výkon reaktoru byl 50 MW. Koncept byl později využit v projektu XT-ADS.

**Swiss Spallation Neutron Source (SINQ)** [21] je projektem výzkumného institutu Paula Scherrera (PSI) ve Švýcarsku. V původním návrhu se počítalo s tekutým terčem Pb-Bi. V době výstavby ovšem nebyla technologie tekutých terčů dostatečně prozkoumána, a proto byl zvolen pevný terč, tvořený tyčemi zirkonia. SINQ byl poprvé spuštěn roku 1996, v roce 2000 byl původní terč nahrazen olověným terčem v zirkoniovém obalu, nazývaný ‚cannelloni‘. Od roku 2006 byly na zařízení prováděny experimenty v rámci projektu MEGAPIE s tekutým terčem Pb-Bi. Po ukončení experimentů s tekutým terčem byl navrácen původní ‚cannelloni‘ terč. Zařízení je vyobrazeno na Obr. 4 [21].



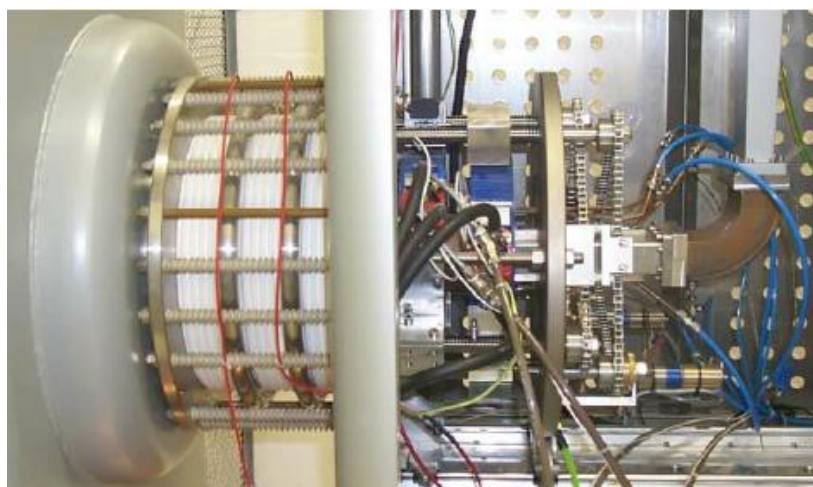
Obr. 4 Zařízení SINQ [21].

**Scattered Neutron Detection Assembly (SCANDAL)** [22] bylo zařízení pro detekci pružně rozptýlených neutronů o energiích z intervalu 50 až 130 MeV, instalované v The Svedberg Laboratory (TSL) ve švédské Uppsale. Byl zde použitý terč z lithia, ostřelovaný protony. Účelem byl sběr dat pro ADS a léčbu ozařováním.

**European Facilities for Nuclear Data Measurements (EFNUDAT)** [23] byla síť evropských zařízení pro sběr jaderných dat. Koordinátorem celého projektu byla Uppsala University (UU) se svým zdrojem neutronů v TSL, který byl jeden z devíti zařízení zahrnutých do projektu.

**Spallation Based on a Large Acceptance Dipole Magnet (SPALADIN)** [24] je experiment v německém Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI), využívající techniku inverzní kinematiky pro studium spalačních reakcí. Jeho součástí je A Large Acceptance Dipole Magnet (ALADIN) ve spojení s Time Projection Chamber (TPC). Experiment začal roku 2004 s konfigurací 1 GeV protonů, ostřelujících  $^{56}\text{Fe}$  terč.

**Trasmutazione Scorie (TRASCO)** [25] je program italské National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development (ENEA), zaměřený na studium fyziky a vývoj technologií potřebných pro návrh ADS. Skládal se zdroj protonů (75 keV, 50 mA) TRASCO Intense Proton Source (TRIPS), zachyceného na Obr. 5 [26], urychlovače a podkritického systému s terčem Pb-Bi. Na základě TRASCO byl vypracován návrh supravodivého urychlovače, schopného dodat 30 mA protonovému paprsku energii 0,1-1,7 GeV.



Obr. 5 Zdroj protonů TRIPS [26].

**Triga Accelerator Driven Experiment (TRADE)** [27] navrhl Carlo Rubbia v době, kdy byl ředitelem ENEA. Experiment byl proveden na již existujícím reaktoru TRIGA (Training, Research, Isotopes, General Atomics). Jde o spojení protonového cyklotronu (140 MeV) s pevným tantalovým terčem, umístěným právě v reaktoru TRIGA.

**Energy plus Transmutation (E+T)** [28] byl mezinárodní projekt pro studium spalačních reakcí. Experimentální zařízení bylo sestaveno v JINR. Olověný terč o délce 48 cm a průměru 8,4 cm, rozdělený na 4 části s 0,8 cm mezerami, byl obklopen blanketem z neobohaceného uranu. Blanket měl podobu malých proutků obalených hliníkem. Jako urychlovač byl opět použit Nuclotron.

**Energy and Transmutation of Radioactive Wastes (E&T RAW)** [29], projekt v JINR, měl za cíl komplexní výzkum interakce paprsků protonů a deuterónů z urychlovače Nuclotron o energii 1 až 10 GeV s kvazi-nekonečnými terči. Projekt zahrnuje data z projektů E+T a Gamma-3. Pro hlavní experimenty byl navržen flexibilní terč EZHIK (Obr. 6 [30]) – kvazi-nekonečný terč z uranu, vybavený měřicími kanály. Byly navrženy dvě varianty:

- EZHIK-U
- EZHIK-Pb – se stejnou geometrií jako EZHIK-U, ale celý vnitřní objem tvořilo olovo, byl určen k experimentům před použitím uranového terče



Obr. 6 Fotografie terče EZHIK [30].

**SAD** [31] byl další ADS projekt JINR. Jeho součástí byl urychlovač protonů Phasotron (660 MeV) a výměnný, vertikálně orientovaný spalační terč (varianty Pb, Pb-Bi, W), jako palivo byly využity palivové články MOX (směs oxidů uranu a plutonia) z reaktoru BN-600. Malý proud v urychlovači (3,2  $\mu$ A) řadí SAD do půli cesty mezi reaktory s nulovým výkonem a reaktory pro průmyslové využití.

**Coordination Action on Nuclear Data for Industrial Development in Europe (CANDIDE)** [23] byl projekt, jehož cílem byl sběr jaderných dat pro vývoj reaktorů s důrazem na ADS a reaktory IV. generace. Probíhal v letech 2007-2008 a koordinátorem byla UU. Výstupem byl mimo jiné návrh oblastí pro budoucí výzkum.

**BLAŽKA** [32] je subkritické zařízení, které bylo navrženo na ČVUT v Praze. Zařízení obsahovalo 232 kazet EK-10, NaF (v obalu z polyethylenu), grafit a polyethylen, vše umístěné v hliníkovém obalu se čtvercovým otvorem ve středu, který byl určený pro vložení zdroje neutronů. K jeho vývoji byl využit cyklotron U-120M Ústavu Jaderné Fyziky (ÚJF) v Řeži u Prahy. Pro experimenty byla zvolena konfigurace 18 MeV deuterónů, ostřelujících beryliový terč. Experimenty proběhly v roce 2007.



**Intense Resonance Neutron Source (IREN)** [33] byl sestaven v JINR. Skládal se z 200 MeV lineárního urychlovače elektronů LUE-200 a podkritického reaktoru. Byl určen pro získání maximálního výtěžku rezonančních neutronů (s energií  $1-10^5$  eV). Při experimentech byl elektrony ostřelován wolframový terč, umístěný ve středu podkritického zařízení s rychlými neutrony.

Evropská komise financuje od devadesátých let 20. století výzkum Evropského společenství pro atomovou energii (EURATOM) skrze Rámcové Programy-Framework Programmes (FP). Od 3. rámcového programu (FP3) je součástí i plán Partitioning and Transmutation (P&T), tedy Oddělení a Transmutace. Od FP5 zájem EURATOMu o P&T značně roste [34].

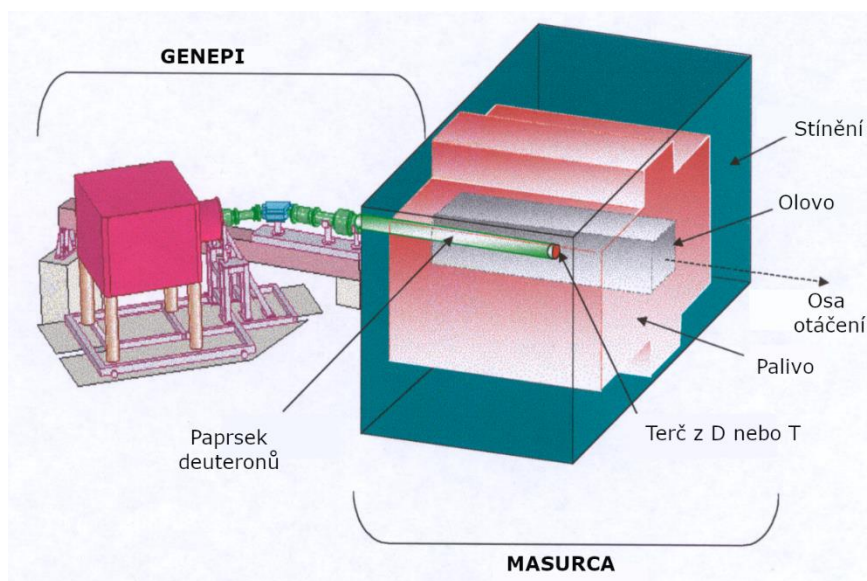
**Advanced Options for Partitioning and Transmutation (ADOPT)** [34] jako součást FP5 vznikl za účelem koordinace projektů zaměřených na ADS. Má čtyři sekce:

- PARTITION se zaměřením na chemickou separaci radionuklidů,
- BASTRA pro základní studie transmutací (MUSE, HINDAS, N-Tof\_ND\_ADS),
- TESTRA pro studium transmutačních technologií (SPIRE, TECLA, MEGAPIE, ASCHLIM),
- FUETRA pro studium paliv (CONFIRM, Thorium Cycle, FUTURE).

Cílem bylo dosáhnout spolupráce mezi FP5 projekty a programy jednotlivých států, přezkoumat výsledky FP5 projektů, zjistit mezery v P&T výzkumných programech jednotlivých států a udržovat kontakt s mezinárodními organizacemi a zeměmi mimo EU, které pracují na P&T a ADS výzkumu. Jednotlivé části programu ADOPT budou představeny níže.

**Multiplication avec Source Externe (MUSE)** [25] je experiment Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) ve francouzském Cadarache, složený z urychlovače GENEPI (Générateur de Neutrons Pulsé Intense), terče založeného na reakcích (D,D) a (D,T), a zařízení MASURCA (Maquette Surgénératrice Caradache), které umožňuje vložení různých podkritických médií. Spojení obou zařízení je znázorněno na Obr. 7 [25]. Při použití vždy stejného MOX paliva byly zvoleny tři hlavní experimentální konfigurace podle druhu použitého chladiva:

- MUSE-4, chlazený sodíkem
- MUSE-5 Pb, chlazený olovem
- MUSE-5 Gas, bez chladiva – simulace chlazení plynem



Obr. 7 Zařízení MUSE [25].

**High and Intermediate Energy Nuclear Data for Accelerator-Driven Systems (HINDAS)** [35] zahrnuje 16 laboratoří v Evropě v rámci FP5. Cílem HINDAS je pochopení jaderných reakcí v oblasti energií 20 až 2000 MeV, za účelem návrhu spalačního terče pro ADS. Na měřeních se podílí šest laboratoří:

- Université catholique de Louvain (UCL), kde je urychlovačem cyklotron, produkující protony o energiích 20-70 MeV,
- UU s urychlovačem TSL (20-180 MeV),
- Kernfysisch Versneller Instituut (KVI) v Groningenu s urychlovačem AGOR (130-190 MeV),
- PSI ve Villigenu, s cyklotronem (45-70 MeV),
- Forschungszentrum (FZ) v Jülichu s urychlovačem COSY (50-2500 MeV),
- GSI v Darmstadtu s urychlovačem SIS (300-1000 MeV/A).

Uvažované materiály terčů byly železo, olovo a uran.

**Neutron Time-of-Flight Facility (n\_TOF)** [36] experiment probíhal na PS v CERNu mezi lety 2001 a 2004 a po přepracování terče opět od roku 2008. Byl navržen ke zkoumání interakcí neutronů s jádry, kdy energie neutronu může být od jednotek meV po několik GeV. Protony s magnetickým momentem 20 GeV/c ostřelovaly 1,3 tunový válcový terč z olova.

**Spallation and Irradiation Effects (SPIRE)** [37] projekt měl za cíl výzkum účinků ozařování na 9-12 % Cr martenzitickou korozivzdornou ocel. Ta byla zvolena jako dostatečně odolný materiál pro podmínky v zařízeních ADS.

**Technologies, Materials and Thermal-Hydraulics for Lead Alloys (TECLA)** [38] je další projekt FP5 zaměřený na materiály použité v ADS, konkrétně na technologii tekutých těžkých kovů.

**Megawatt Pilot Experiment (MEGAPIE)** [39] byl první megawattový spalační neutronový zdroj na světě. Experiment byl navržen roku 1999 a provozován byl na SINQ. Cílem bylo změnit koncept spalačního terče oproti dosavadním experimentům, vyvinout systém chlazení a navrhnout okno mezi terčem a urychlovačem tak, aby odolalo náročným podmínkám. Spalační terč byl zhotoven z eutektika Pb-Bi, navíc obsahoval wolfram pro ochranu před intenzivním zářením. Terč je zachycen na Obr. 8 [40].



*Obr. 8 Spalační terč experimentu MEGAPIE před instalací [40].*

**Assessment of Computational Fluid Dynamics Codes for Heavy Liquid Metals (ASCHLIM)** [41] měl za cíl posouzení stavu technologií v oblasti těžkých tekutých kovů (HLM z angl. *Heavy Liquid Metals*). Hlavními směry výzkumu bylo modelování turbulentního proudění, úprava povrchu při použití bezokénkového terče a modelování vstřikování plynu do HLM.

**Collaboration On Nitride Fuel Irradiation and Modelling (CONFIRM)** [23] se zabýval výzkumem nitridového paliva bez obsahu uranu jakožto možného paliva pro ADS reaktory. Čtyři palivové tyče (Pu, Zr)N byly vyrobeny v PSI, následně měly být ozařovány ve Studsviku. V důsledku odstavení tamního reaktoru bylo ozařování nakonec provedeno na německém High Flux Reactor (HFR).

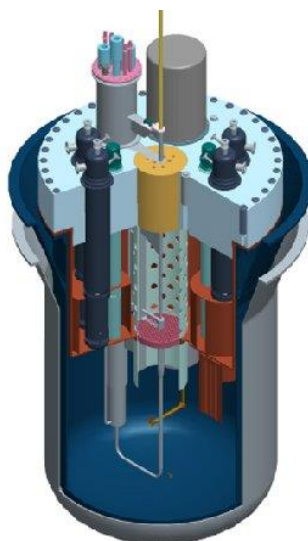
**Thorium Cycle** [42] se zabýval možností užití Th jako paliva pro reaktory PWR, FR i ADS.

**Preliminary Design Studies of an Experimental Accelerator-Driven System (PDS-XADS)** [43] projekt spojuje výsledky z programu ADOPT. Výzkum byl orientovaný na reaktor s rychlými neutrony, chlazený plynem nebo tekutým kovem. Účelem byla transmutace jaderného odpadu bez výroby elektrické energie. Použité palivo mělo být klasické MOX. Nejdiskutovanějším z navržených konceptů je MYRRHA.

**European Research Programme for the Transmutation of High Level Nuclear Waste in an Accelerator Driven System (EUROTRANS)** [44] projekt byl součástí FP6 a jeho cílem bylo demonstrovat možnost transmutace jaderného odpadu při použití ADS v průmyslovém měřítku. Projekt byl rozdělen na jednotlivé části:

- DM1 – Design – se věnoval návrhům EFIT a XT-ADS,
- DM2 – ECATS – zaměřený na způsoby měření reaktivity,
- DM3 – AFTRA – vývoj bezuranového paliva,
- DM4 – DEMETRA – chování materiálů a technologie HLM,
- DM5 – NUDATA – vyhodnocení dat.

**Experimental Facility Demonstrating the Technical Feasibility of Transmutation in an Accelerator Driven System (XT-ADS)** [45] je projekt, pro jehož návrh belgické SCK•CEN nabídlo využít původní model MYRRHA 2005. Jde o bazénový reaktor s MOX palivem, který využívá jako chladivo a zároveň jako materiál terče eutektikum Pb-Bi. Zdrojem protonů (600 MeV, 3 mA) je supravodivý urychlovač Linac CW. Jde o testovací zařízení hlavních součástí EFIT. XT-ADS je zobrazen na Obr. 9 [46].

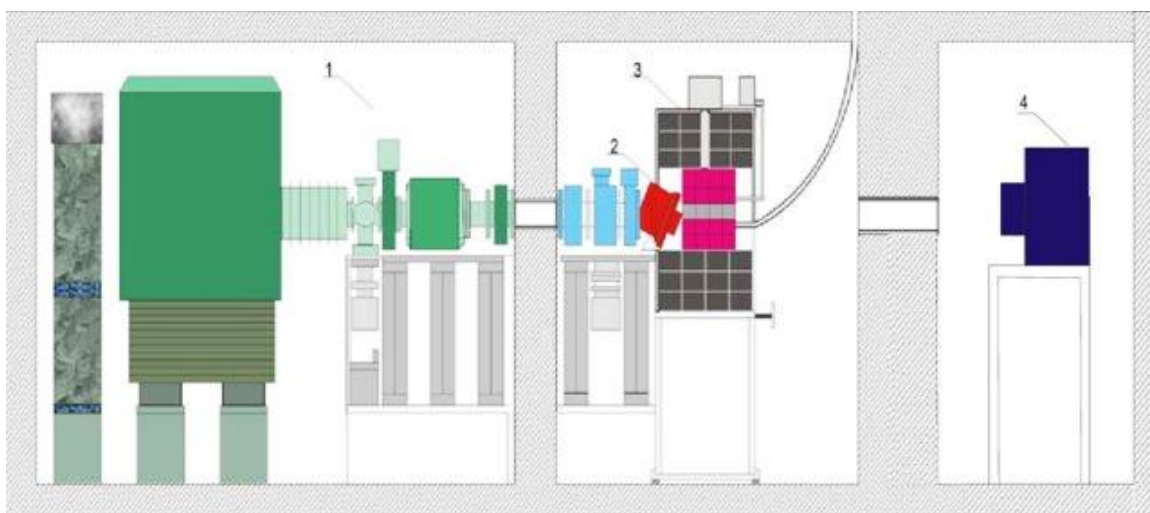


Obr. 9 Model zařízení XT-ADS [46].

**European Facility for Industrial Transmutation (EFIT)** [45] má být zařízení k dlouhodobému využití, hlavním účelem jeho vzniku je likvidace MA a výroba energie. Očekávaný rok dostavby je 2040. Jako terč i chladivo bude využito olovo, urychlovačem, stejně jako u XT-ADS, má být Linac CW, očekávaná energie protonů je 800 MeV při 20 mA. Jako palivo je uvažována bezuranová směs oxidů plutonia a MA. Jako alternativa k EFIT-Pb využívajícímu olovo byl navržen EFIT-He, kde by mělo být chladivem helium.

**Experimental Activities on the Coupling of an Accelerator, a Spallation Target and a Sub-critical Blanket (ECATS)** [44] se jako součást EUROTRANS zabýval experimenty, které měly za cíl rozšířit dosavadní znalosti ohledně ovládání ADS a ověřit výpočetní metody parametrů týkajících se bezpečnosti. Skládal se z experimentů YALINA, RACE (projekt USA) a GUINEVERE.

**YALINA** [47] bylo podkritické zařízení v běloruském Minsku, které bylo v provozu do roku 2008. Bylo tvořeno urychlovačem deuteronů a terčem Ti-D nebo Ti-T. Palivem byl 10% obohacený uran ve formě palivových tyčí, které byly uloženy mezi polyethylenovými bloky, sloužícími jako moderátor. Konstrukčně se podobalo zařízení MUSE, ale při srážkách byly produkovány tepelné neutrony. Účelem výzkumu na tomto zařízení byl vývoj způsobu on-line monitorování hladiny reaktivity ADS. Zjednodušený náčrt zařízení je zobrazen na Obr. 10 [48].



Obr. 10 Zařízení YALINA, kde (1) je urychlovač, (2) spalační terč, (3) podkritický reaktor a (4) gamma spektrometr [48].

**Generator of Uninterrupted Intense Neutrons at the Lead Venus Reactor (GUINEVERE)** [49] je nízkoenergetický ADS s univerzálním zdrojem neutronů GENEPI-3C, který pohání rychlý podkritický reaktor VENUS-F. Neutrony s energií 14 MeV v GENEPI-3C vznikají ostřelováním tritiového terče paprskem deuteronů o energii 250 keV. Vlastnosti urychlovače umožňují rychlé změny režimu paprsku, který může být buď nepřerušovaný, anebo pulsní. V aktivní zóně se nachází 93 palivových souborů čtvercového průřezu, tvořených vysoce obohaceným  $^{235}\text{U}$  a proutky z olova. Jde o zařízení ke zkoumání fyziky rychlých podkritických reaktorů v SCK•CEN, vzniklé v rámci FP6.

**Advanced Fuels for Transmutation Systems (AFTRA)** [44] měl za cíl zkoumat chování paliva s obsahem MA a plutonia bez uranu.

**Development and Assessment of Structural Materials and Heavy Liquid Metal Technologies for Transmutation Systems (DEMETRA)** [44] byl projekt, jehož úkolem byl vývoj technologií HLM, charakterizace materiálů a termohydraulické experimenty pro návrh spalačního terče a reaktoru.

**Nuclear Data for Transmutation (NUDATRA)** [44] se zabýval vylepšením nástrojů pro simulaci aktivní zóny ADS, stínění a palivového cyklu na základě dostupných knihoven jaderných dat.

**Red-Impact** [50] projekt FP6 se zaměřil na vliv P&T a technologií redukce odpadu na nakládání s jaderným odpadem, a hlavně na jeho konečné uložení. Zapojilo se 23 organizací, včetně organizací zabývajících se vývojem ADS.

**Generation IV and Transmutation Materials (GETMAT)** [23] byl projekt FP7 pod záštitou Karlsruhe Institute of Technology (KIT). Vznikl kvůli potřebě najít vhodnou ocel pro využití v reaktorech IV. generace a v reaktorech ADS.

**Fabrication, Irradiation and Reprocessing of Fuels and Targets for Transmutation (FAIRFUELS)** [23] je projekt FP7, zaměřující se zejména na paliva obsahující MA, jejich výrobu, výkon, post-radiační zkoušky a modelování dříve testovaných paliv.

**SUPERFACT** [23] je projekt FP7, který má za cíl navrhnout zařízení MYRRHA-FASTEF.

**Fast Reactor Experiments for Hybrid Applications (FREYA)** [51] byl pětiletý projekt FP7, spuštěný roku 2011, první experimenty byly zahájeny v roce 2012. Zahrnoval šest „pracovních balíčků“ – Working Packages (WP):

- WP1: Metodologie on-line monitorování reaktivity v ADS (zařízení VENUS-F).
- WP2: Konfigurace subkritického MYRRHA/FASTEF pro návrh a získání licence.
- WP3: Konfigurace kritického MYRRHA/FASTEF pro návrh a získání licence.
- WP4: Konfigurace kritického rychlého reaktoru chlazeného olovem (LFR, z angl. Lead-Cooled Fast Reactor).
- WP5: Školení a vzdělávání.
- WP6: Koordinace FREYA projektu.

Jednotlivá zařízení jsou popsána níže.

**Test Infrastructure and Accelerator Research Area (TIARA)** [52] byl projekt FP7, jehož záměrem byla integrace národních a mezinárodních R&D (Research and Development) projektů do jednoho společného pro Evropu.

**Test Material Irradiation Facility (TMIF)** [53] byl sestaven v CERNu v rámci FP7 – TIARA. Bylo třeba ověřit vliv následujících faktorů na materiály:

- ozáření neutrony (vzniklých ze spalačních reakcí),
- ozáření protony (přímo paprskem),
- namáhání tlakem a krutem,
- koroze vlivem tekutých kovů,
- vysoká teplota.

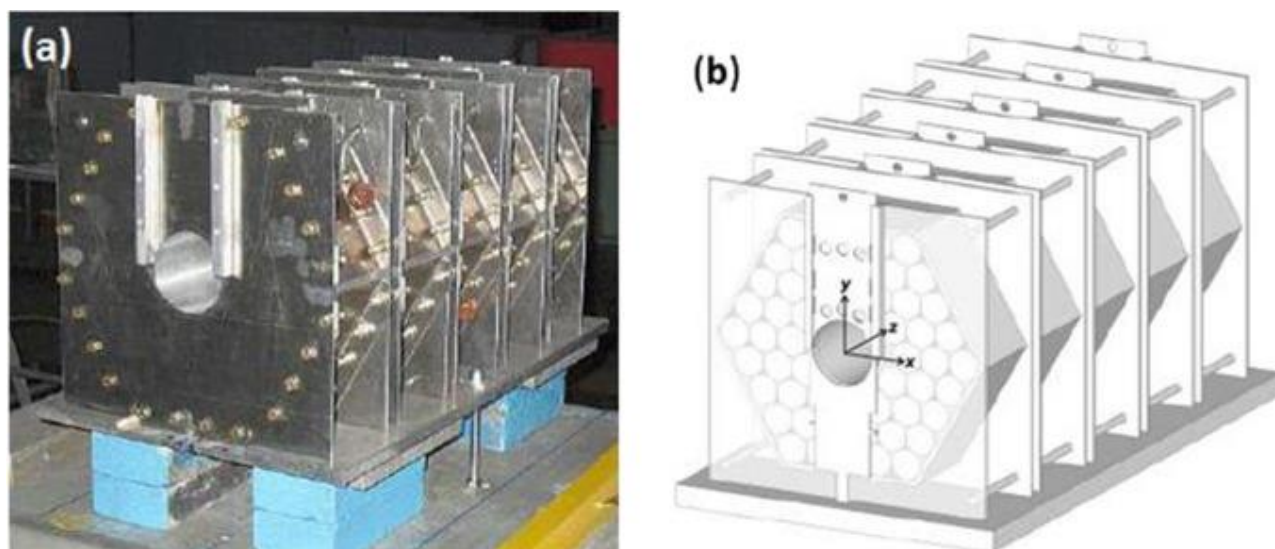
Urychlené protony v experimentech měly kinetickou energii 200-600 MeV při proudu menším než 500  $\mu\text{A}$ .



**European Isotope Separation On-Line (EURISOL)** [54] je projekt PSI v rámci FP7, jehož účelem byl výzkum neutronových spalačních zdrojů z tekutých kovů. Cílem byl bezpečný provoz zařízení při výkonu 4 MW. Spalační terč byl obklopen terči ze štěpného materiálu, ve kterých podle očekávání by po zasažení neutrony pocházejícími ze spalačního terče měly vznikat vzácné izotopy. Pro vylepšení výtěžků ze štěpných reakcí byl vyžadován velký neutronový tok, způsobený intenzivním svazkem protonů, zasahujícím terč přes relativně tenké okénko (0,8 mm).

**Electro-Nuclear Neutron Generator (ENNG)** [55] se skládá z lineárního urychlovače protonů ISTR-36 s energií 36 MeV, Be terče o tloušťce 6 mm a těžkovodního podkritického blanketu. Nachází se v ruském Institute of Theoretical and Experimental Physics (ITEP). Přestože se jedná o malé zařízení, je významné pro výzkum chování ADS.

**QUINTA** [18] je terč v JINR, tvořený 512 kg přírodního uranu, s průměrem 30 cm a délkou 65 cm, v jehož středu je 8 cm okénko pro urychlený paprsek (Obr. 11 [56]). Terč obklopený 19,5 t ochuzeného uranu byl ostřelovaný protony, deuterony a ionty uhlíku z urychlovačů Nuclotron a Phasotron.



Obr. 11 Terč QUINTA. (a) fotografie terče, (b) 3D návrh s průhledným předním plátem pro znázornění rozložení uranových tyčí [56].

**Big Uranium Assembly (BURAN)** [18] je dalším z terčů JINR, vyrobený z 21 t kovového ochuzeného uranu válcového tvaru s průměrem 1,2 m a délkou 1 m, umístěný v ocelovém obalu. Experimenty budou provedeny ve spojení s urychlovačem Phasotron.

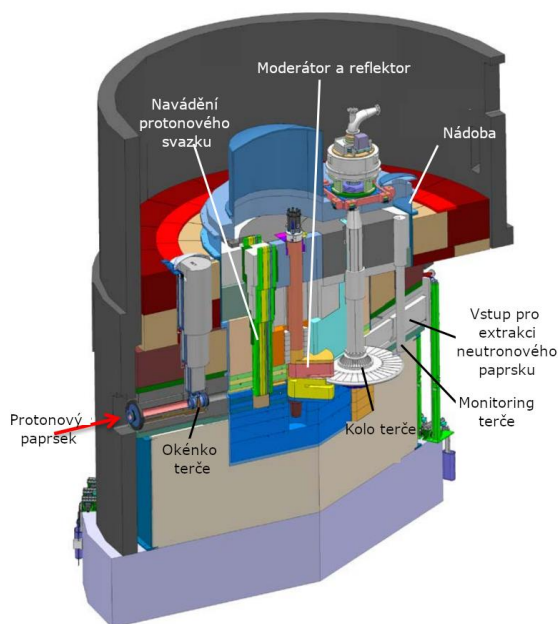
**Geel Electron Linear Accelerator Facility (GELINA)** [57] je zařízení v belgickém Institute for Reference Materials and Measurements (IRMM), na kterém probíhá výzkum zaměřený na přesné měření účinných průřezů metodou time-of-flight. Skládá se z 150 MeV lineárního urychlovače elektronů, ostřelujících uranový terč, kde v důsledku fotojaderných reakcí dojde k produkci neutronů.

**Turkic Accelerator Complex (TAC)** [58] je komplex urychlovačů, zahrnující i lineární urychlovač protonů s energií 1 GeV, určený k výzkumu ADS. Vzhledem ke značným zásobám thoria v Turecku se ADS jeví jako ideální zdroj energie.

**Electron Irradiation Test Facility (EITF)** [59], projekt ukrajinského Kharkov Institute of Physics and Technology (KIPT), byl dostavěn a získal licenci, ale prozatím není v provozu.

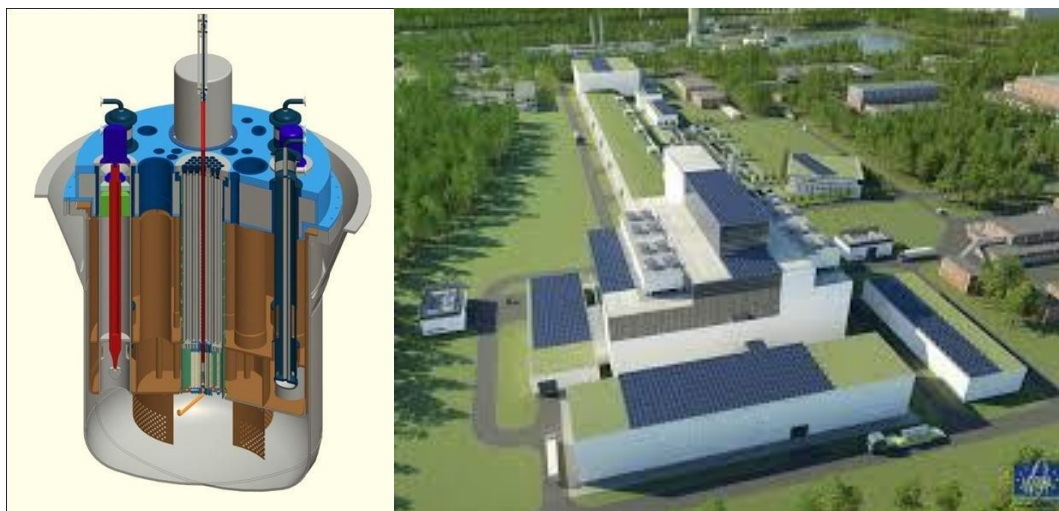
Je tvořen lineárním urychlovačem elektronů s energií 100 MeV, které mají ostřelovat terč z wolframu nebo uranu. Palivem je nízko obohacený uran.

**European Spallation Source (ESS)** [60] je aktuálně ve výstavbě, která by měla pokračovat do roku 2025. Po dokončení se má jednat o zařízení pro výzkum rozptylu neutronů s vedoucím postavením ve světě. Zařízení bude tvořeno přes 500 m dlouhým lineárním urychlovačem protonů (2 GeV, 62,5 mA) a otočným terčem, který bude vyroben z 6840 wolframových cihel a bude chlazený héliem. Zařízení je znázorněno na Obr. 12 [61].



Obr. 12 Průřez zařízením ESS [61].

**MYRRHA Fast-Spectrum Transmutation Experimental Facility (MYRRHA-FASTEF)** [20] je poslední návrh projektu MYRRHA. Jeho hlavní součásti mají být stejné jako v případě MYRRHA a XT-ADS, pouze ve větším měřítku. Protony mají být urychlovány lineárním urychlovačem (600 MeV, 4 mA), zakončeným okénkem. Palivem reaktoru má být MOX, terčem a zároveň chladivem eutektikum Pb-Bi. Obr. 13 [46][64] znázorňuje, jak bude vypadat samotné zařízení a budovy, ve kterých bude situováno. Uvedení do provozu je plánováno na rok 2033. [62]



Obr. 13 Model zařízení MYRRHA-FASTEF [46] a 3D simulace budov, ve kterých bude zařízení situováno [64].

**Accelerator-Driven Thorium Reactor (ADTR)** [63] vyvíjí britská společnost Jacobs ve spolupráci s Carlo Rubbiiem. Cílem je navrhnout 600MW<sub>e</sub> elektrárnu. Palivem mají být pelety MOX (15,5 % Pu a 84,5% Th). Terč a chladivo budou z tekutého olova. Původně bylo uvažováno eutektikum Pb-Bi, návrh byl zavržen z důvodu produkce <sup>210</sup>Po při spalačních reakcích. První funkční ADTR je plánován na rok 2030.

**Troitsk ADS Project** [65] je návrh zařízení v ruském Institute for Nuclear Research (INR) v Troisku. Má jít o reaktor s výkonem v řádu MW. Součástí návrhu je tamní lineární urychlovač protonů (600 MeV, 500 mA), ozařující terč (uvažují se materiály jako W, U nebo Pb-Bi). Jako palivo byla navržena směs UO<sub>2</sub>, PuO<sub>2</sub> obohacený <sup>239</sup>Pu. V aktivní zóně se má nacházet šest hermetických kapslí z Pb-Bi, obsahujících vysoce obohacené palivo a MA.

### 3.2 Projekty v Americe

**PHOENIX** [66] byl návrh zařízení z roku 1991 pro transmutaci radioaktivních odpadů z LWR reaktorů a zároveň pro výrobu energie. Měl být tvořen lineárním urychlovačem protonů (104 mA, 1,6 GeV) a podkritickým souborem mřížek z MA.

**Accelerator-Driven Transmutation Technology (ADTT)** [67] je projekt, věnující se způsobu nakládání s odpadem z jaderných zbraní a z komerčně využívaných jaderných elektráren. Palivo reaktoru je ve formě tekutých solí, uprostřed reaktoru se nachází olověný terč, ostřelovaný lineárním urychlovačem protonů (800 MeV).

**Accelerator-Based Conversion (ABC)** [67] je dílčím projektem programu ADTT. Likvidace odpadu z lehkovodních jaderných elektráren vyžaduje externí zdroj neutronů, kterým může být dvojice urychlovač-terč. Další možností, která je zároveň předmětem ABC, je zisk neutronů štěpením materiálu z jaderných zbraní.

**Accelerator-Driven Energy Production (ADEP)** [67] je dalším z dílčích projektů ADTT. Jako palivo je využito <sup>232</sup>Th, které se zachytem neutronu přemění na <sup>233</sup>U. Výhodou využitého palivového cyklu je, že nevzniká prakticky žádné plutonium. Jako další výhoda byla uvažována možnost užití vzniklého <sup>233</sup>U pro jaderné zbraně.

**Accelerator Transmutation of Waste (ATW)** [67] je třetím z nejvýznamnějších subprojektů ADTT. Jeho cílem je likvidace MA a LLFP z vyhořelého jaderného paliva LWR. Výhodou je, že není nutné přepracování vyhořelého paliva, jediným požadavkem je odstranění zinkového obalu.

**Spallation Neutron Source (SNS)** [68] vznikl ve spolupráci šesti amerických laboratoří. Systém se skládá z komplexu urychlovačů s akumulacním prstencem, který 1MW pulzy protonů o energii 1 GeV ostřeluje tekutý rtuťový terč, zobrazený na Obr. 14 [69]. Stavba začala roku 1998. Součástí plánu byla i možnost dalšího upravení systému pro zvýšení výkonu.



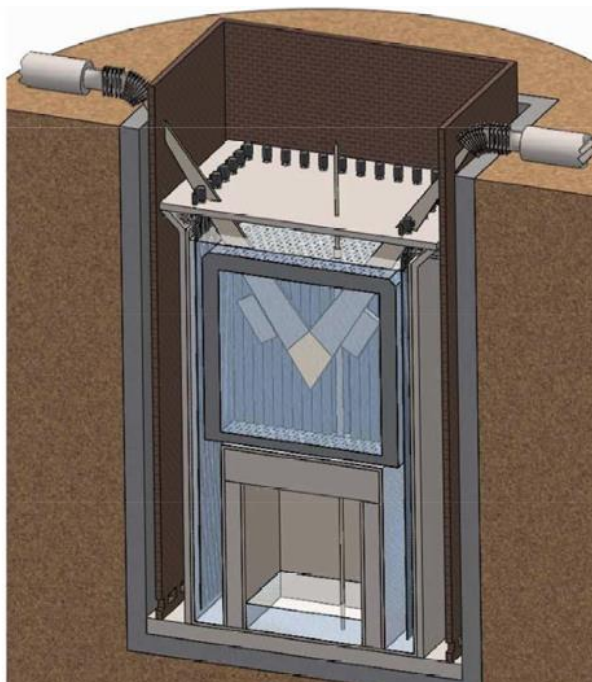
Obr. 14 Fotografie terče zařízení SNS [69].



**Reactor-Accelerator Coupling Experiments (RACE)** [70] je projekt Idaho State University (ISU). Experimenty byly vedeny zde a v University of Texas (UT) v letech 2004 až 2006. K produkci neutronů byl využit urychlovač elektronů a terč z těžkých kovů. Při experimentech na UT byl využit reaktor TRIGA.

**FUTURIX-FTA** [71] byl experiment v americkém Phoenixu, který měl za cíl ověřit chování palivových vzorků pro transmutaci vyhořelého paliva při ozařování rychlými neutrony.

**Green Energy Multiplier Subcritical Technology for Alternative Reactors (GEM\*STAR)** [72] je koncept podkritického reaktoru, pracujícího s tepelnými neutrony. Jako palivo jsou uvažovány tekuté soli v grafitu. Reaktor bude umožňovat plné využití vyhořelého paliva z LWR bez předchozího přepracování. Počítá se s využitím kombinace šesti urychlovačů (1,3 mA, 0,5 GeV) a terče z uranu. Návrh zařízení je vyobrazen na Obr. 15 [73].



Obr. 15 Návrh zařízení GEM\*STAR [73].

**Project-X** [74] je urychlovač protonů (1 mA, 1-2 GeV), který má být postaven ve Fermilabu v průběhu 20. let. Díky svým vlastnostem má sloužit jako experimentální zařízení pro výzkum chování ADS. Terč bude tvořit směs Pb-Bi, palivem má být vyhořelé jaderné palivo.

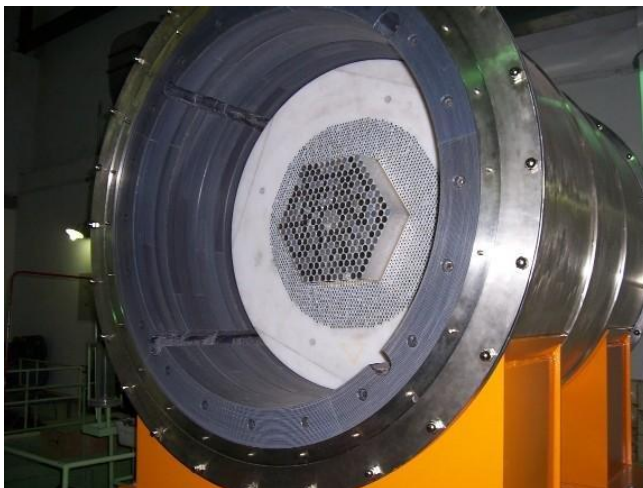
### 3.3 Projekty v Asii

**Options for Making Extra Gains from Actinides and Fission Products (OMEGA)** [75] byl program Japan Atomic Energy Research Institutu (JAERI), zaměřený na výzkum a vývoj urychlovačem řízené transmutace spolu s transmutací pomocí rychlých reaktorů a technologií přepracování. V rámci výzkumu ADS byl navržen Engineering Test Accelerator (ETA), intenzivní lineární urychlovač protonů (1,5 GeV, 10 mA). Pro reaktor a terč byly uvažovány dvě varianty. První z variant byl reaktor založený na koncepci sodíkem chlazeného rychlého reaktoru se spalačním terčem z wolframových disků a palivem ve formě slitiny z MA. Dalším návrhem byl reaktor s tekutými solemi z MA, které měly fungovat jako palivo a zároveň jako terč.

**Hybrid Power Extraction Reactor (HYPER)** [76] je výzkumný projekt Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), probíhající od roku 1997, který byl navržen za účelem transmutace transuranů a štěpných produktů, které slouží jako palivo reaktoru. Terčem a zároveň chladičem je směs Pb-Bi. Terč je ostřelován svazkem protonů (1 GeV, 10,6-16,4 mA).

**Kumatori Accelerator-Driven Reactor Test Facility (KART)** [77] byl projekt japonské Kyoto University Research Reactor Institute (KURRI), jehož cílem bylo studium dopadu původní energie neutronu na efektivní multiplikační faktor podkritického systému. KART je tvořen komplexem urychlovačů Fixed Field Alternating Gradient (FFAG), spojených s Kyoto University Critical Assembly (KUCA). Před zahájením pokusů na FFAG-KUCA bylo nejprve zařízení KUCA spojeno s Cockroft-Waltonovým urychlovačem. Při obou typech experimentů se spalační terč nachází vně aktivní zóny reaktoru, palivem je kombinace vysoce obohaceného uranu s thoriem. Moderátorem je polyethylen nebo grafit.

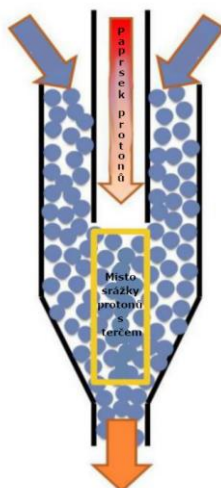
**Venus-1** [78], vyobrazené na Obr. 16 [78], je první experimentální ADS zařízení v Číně, spuštěné roku 2005, jehož aktivní zóna se skládá ze zóny rychlých neutronů, kterou obklopuje zóna tepelných neutronů. Rychlé neutrony jsou vhodné k transmutaci MA, tepelné neutrony štěpí LEU. Epitermální neutrony na pomezí zón rychlých a tepelných neutronů jsou vhodné k transmutaci LLFP. Jako zdroj neutronů bylo navrženo několik možností, například urychlovač deuteronů v kombinaci s deuteronovým nebo tritiovým terčem.



Obr. 16 Fotografie z průběhu instalace zařízení Venus-1 [78].

**China Spallation Neutron Source (CSNS)** [79] je čínské zařízení určené k výzkumu spalačních reakcí. Skládá se z  $H^-$  lineárního urychlovače 80 MeV, synchrotronu, urychlujícího paprsek na 1,6 GeV a pevného terče z wolframu. Projektovaný výkon paprsku byl 100 kW s možností přestavby na 500 kW. K výzkumu ADS by bylo třeba doplnit podkritický reaktor.

**Chinese Initiative Accelerator Driven System (CIADS)** [80] je čínské výzkumné zařízení, na jehož základech má být postaven projekt ADANES. Pro účely experimentů byl navržen nový typ spalačního terče, a to sice terč tvořený granulemi wolframu, znázorněný na Obr. 17 [81]. Paprsek protonů (500 MeV, 5 mA) z lineárního urychlovače bude reagovat s granulemi, proudícími od násypníku do oblasti spalační reakce vlivem gravitace. Následně budou granule z podkritického reaktoru vyplaveny. Rychlý reaktor o tepelném výkonu 10MW má být chlazen eutektikem Pb-Bi. CIADS má být postaveno mezi lety 2018-2024.



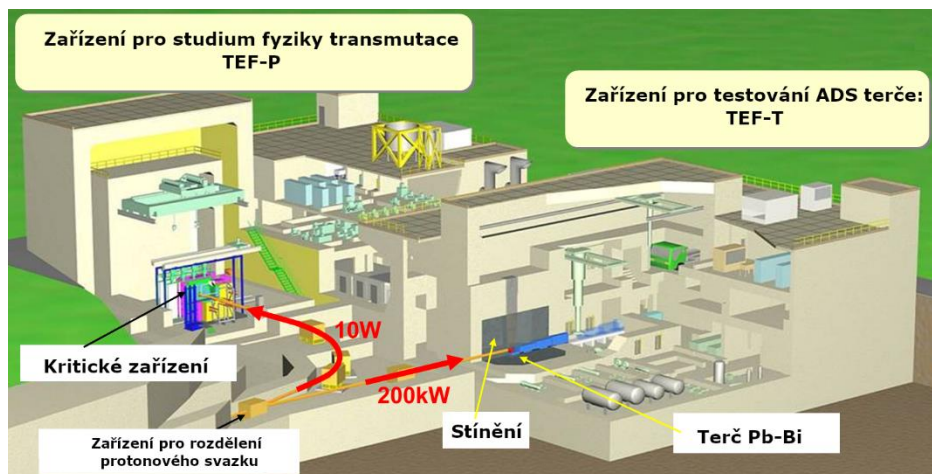
Obr. 17 Princip spalačního terče s granulemi wolframu pro CIADS [81].

**Accelerator-Driven Advanced Nuclear Energy System (ADANES)** [81] se skládá systému spalování a systému recyklace paliva. Spalovací systém je založen na již prověřených principech ADS. Je uvažováno využití hustého terče z granulovaných materiálů, který kombinuje vlastnosti pevných a tekutých terčů. Systém recyklace paliva zahrnuje odstranění části štěpných produktů vysokoteplotní oxidací/redukci a následné oddělení odstředivkou. Stavba se plánuje kolem roku 2030, v další fázi pak má být vzorem pro stavbu ADS elektráren.

**Transmutation Experimental Facility (TEF)** [82] se bude skládat ze dvou experimentálních zařízení, nacházejících se v Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC): ADS Target Test Facility (TEF-T) a Transmutation Physics Experimental Facility (TEF-P). Rozložení zařízení je patrné z Obr. 18 [83].

**TEF-P** [82] má být reaktor s nulovým výkonem, určený ke studiu fyziky reaktoru a sběru jaderných dat pro transmutační systémy (včetně ADS), tvořený lineárním urychlovačem protonů o energii 400 MeV. Unikátní bude svou aktivní zónou, umožňující vkládání velkého množství MA a zároveň tím, že spalační zdroj bude produkovat rychlé neutrony.

**TEF-T** [82] bude zařízení, jehož součástí má být vakuová trubka uvnitř reaktoru, jejímž úkolem je přivést protonový paprsek k terči. Na jejím konci se bude nacházet okno pro protonový paprsek, tvořící hranici mezi vakuem a Pb-Bi eutektickou slitinou.



Obr. 18 Ilustrace rozložení TEF zařízení [83].

**BeO Reflected and HDPe Moderated Multiplying Assembly (BRAHMMA)** [84] je podkritické zařízení v Bhabha Atomic Research Centre (BARC) v Indii, řízené urychlovačem deuteronů (300 kV). Palivem je přírodní uran, moderátorem vysokohustotní polyethylen a reflektorem BO. Terč je umístěn ve středu aktivní zóny, tvořený směsí TiT (titan-tricium) nebo TiD (titan-deuterium). Zařízení je vyobrazeno na Obr. 19 [84]. Pro další fáze vývoje ADS v Indii se počítá s palivem Th-Pu MOX.



Obr. 19 Experiment BRAHMMA s vyznačením umístění měřicích kanálů [84].



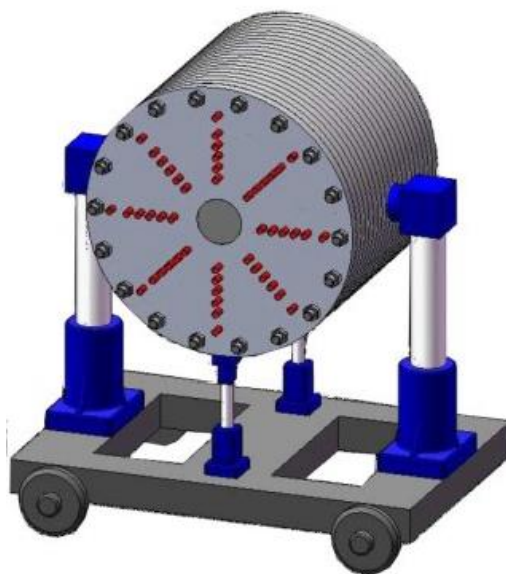
## 4. PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část této práce je zaměřena na optimalizaci neutronového spektra s ohledem na materiál terče. Výpočty byly provedeny pro zařízení BURAN, nacházející se v JINR v ruské Dubně.

### 4.1 BURAN

Zařízení BURAN (Obr. 20 [88]) tvoří válec z ochuzeného uranu ( $0.3\% \text{ }^{235}\text{U}$ ) o délce 100 cm a průměru 120 cm. Válec je obklopen 10 cm silnou vrstvou oceli. V ose uranového válce se nachází válcový otvor o průměru 10 cm určený pro terč, ostřelovaný urychlovačem skrz otvor v ocelovém stínění s průměrem 20 cm. V uranovém blanketu se nachází 72 měřících kanálů rovnoběžných s osou válce, vyplněných vzduchem. Průměr každého kanálu je 3 cm a jsou umístěny ve vzdálenostech 14 cm, 18 cm, 22 cm, 26 cm, 30 cm, 34 cm, 38 cm, 44 cm a 52 cm od osy válce. V každém kanálu je pak 20 měřících bodů, určených pro detektory a ozařované vzorky. [85]

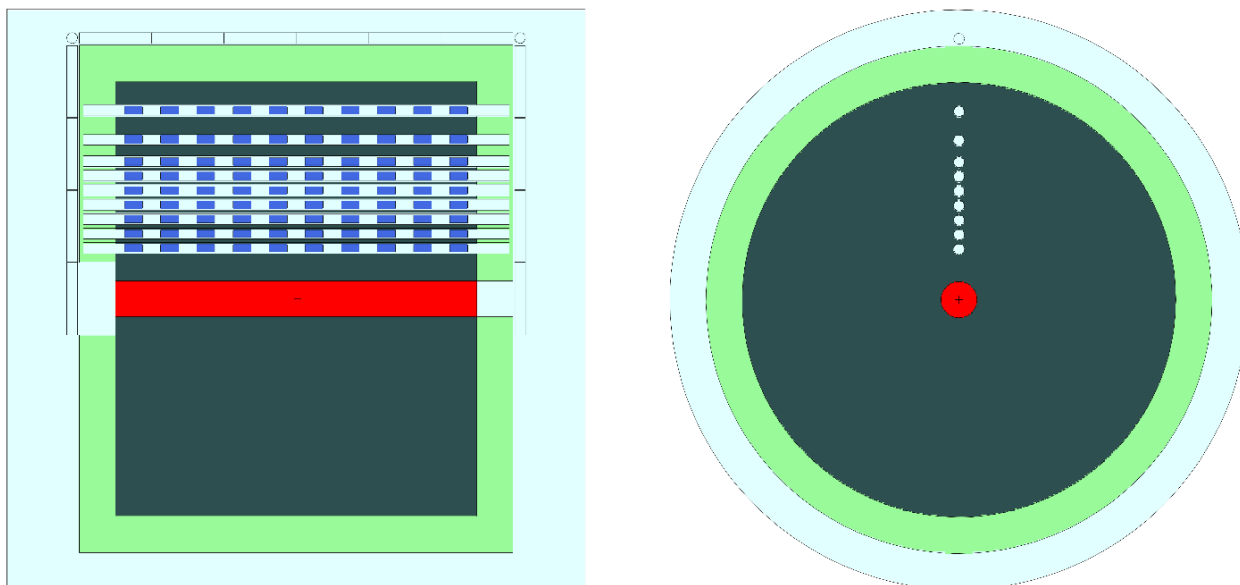
Urychlovačem pro BURAN je Phasotron, nacházející se v DLNP (Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems). Protony v něm mohou dosáhnout energie 660 MeV při proudu  $1,6 \mu\text{A}$ . Takový provoz je vhodný pro experimentální zařízení, pro průmyslové využití ADS by bylo třeba urychlovače s vyšším výkonem. [85]



Obr. 20 3D model zařízení BURAN [88].

Pro simulace byl využit vstupní soubor pro MCNP od pana Ing. Ondřeje Šťastného, jehož geometrie je znázorněna na Obr. 21. Jedná se o zjednodušený model, obsahující pouze jednu sadu měřících kanálů. V každém kanále je umístěno deset aktivačních detektorů z bismutu.

Využití aktivačních detektorů z bismutu je velmi výhodné. Přirozeně se na Zemi vyskytuje pouze izotop  $^{209}\text{Bi}$ . Má velmi dlouhý poločas rozpadu ( $1,9 \cdot 10^{19}$  let) a dlouho byl považován za poslední stabilní prvek v periodické soustavě prvků. [86] Při použití čistého bismutu máme relativně stabilní krystal tvořený jediným izotopem. Zároveň na něm při srážce s neutronem probíhá řada reakcí, jejichž produkty mají poločasy rozpadu vhodné pro aktivační analýzu. Nevýhodou, jak bylo zmíněno již v úvodních kapitolách, je vznik  $^{210}\text{Po}$ , které je silným  $\alpha$  zářičem. [87]



Obr. 21 Model zařízení BURAN v řezu při pohledu z boku (vlevo) a zepředu (vpravo). Uranový válec (tmavě šedá) s terčem (červená) ve svém středu je obklopen vrstvou oceli (zelená). Měřicí kanály jsou vyplněny vzduchem (světle modrá) a nacházejí se v nich detektory z bismutu (tmavě modrá).

## 4.2 Monte Carlo N-Particle Code

Následující text vychází z [89]. Výpočty bylo provedeny pomocí MCNP (Monte Carlo N-Particle Code). Jedná se o univerzální kód pro výpočet transportu částic, využívající metodu Monte Carlo. Použitá metoda se od metod založených na řešení transportních rovnic liší tím, že simuluje jednotlivé částice a zaznamenává uživatelem požadované aspekty jejich chování.

Jako vstup pro simulace slouží uživatelem vytvořený textový soubor s koncovkou INP. Soubor obsahuje informace o řešeném problému, jako je geometrie objektu, popis použitých materiálů, umístění a charakteristika zdroje částic atd. Informace jsou rozděleny do tzv. karet (cards). Karta je označení jednoho řádku vstupního souboru o délce maximálně 128 znaků. Název i délka řádku je zachována z minulosti, kdy byla jako vstup využívány děrné štítky.

Součástí distribuce MCNP jsou i knihovny jaderných dat, obsahující účinné průřezy pro jednotlivé izotopy. V úlohách řešených v rámci této práce byla využívána knihovna ENDF/B.

Výstupem MCNP je textový soubor OUTP, ve kterém jsou zapsány výsledky výpočtu a binární soubor RUNTPE, obsahující data pro spuštění.

Každý ze vstupních souborů uvozuje karta obsahující název řešené úlohy. Za ní následují jednotlivé oddíly karet. První oddíl obsahuje popis jednotlivých buněk: číslo buňky, číslo v ní použitého materiálu, hustotu materiálu a seznam povrchů, tvořící ohraničení buňky.

Druhý oddíl popisuje jednotlivé povrchy. Každá karta zahrnuje číslo povrchu, označení typu povrchu a s ním související parametry (souřadnice, poloměr atd.).

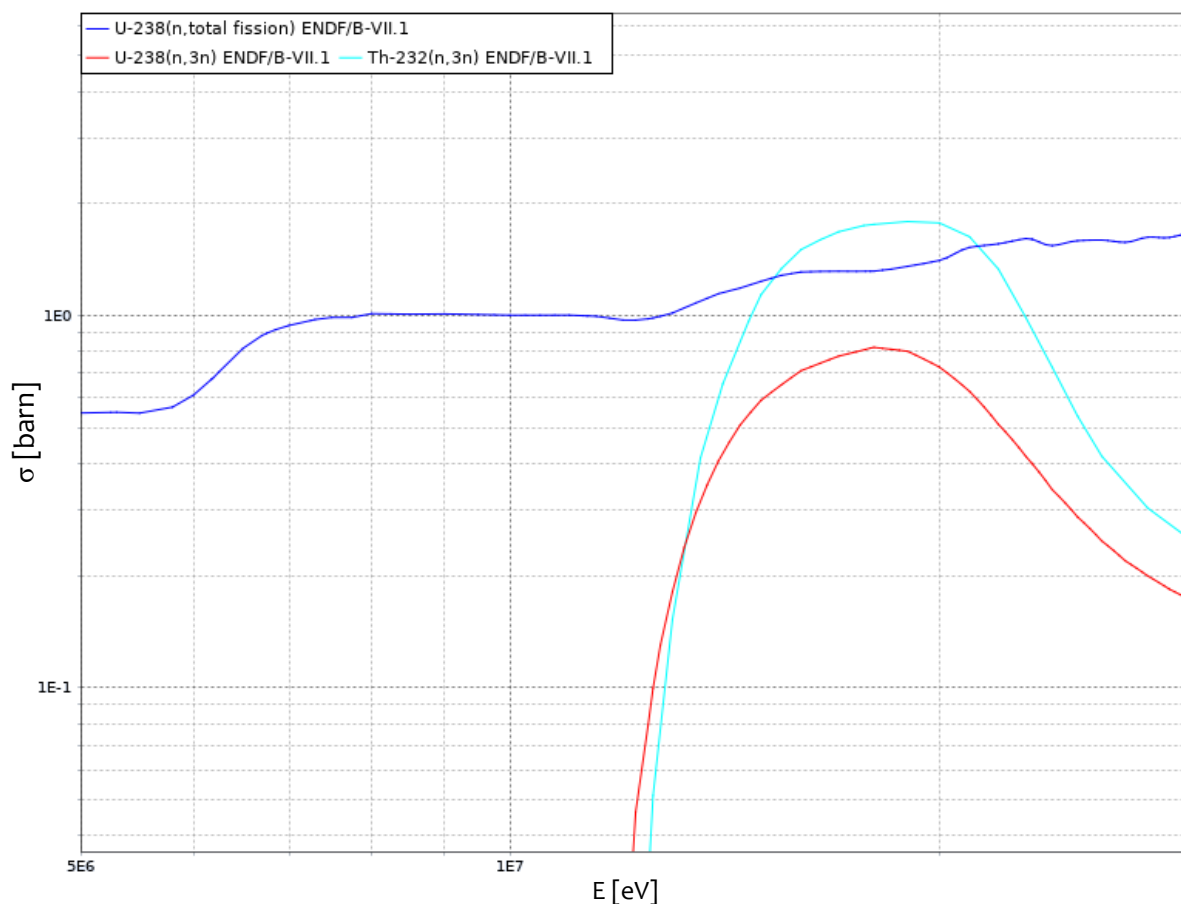
Třetí oddíl specifikuje, co a jakým způsobem má MCNP počítat. Karta MPPHYS ON značí povolení použití fyzikálních modelů při výpočtech. Modely jsou důležité např. pro spalační reakce. Karta MODE udává seznam částic, jejichž transport je sledován v rámci úlohy, konkrétně se jedná

o neutrony, protony, deuterony, fotony, záporné miony, kladné a neutrální piony, těžké ionty a kladné kaony. Následují karty IMP, udávající, ve kterých buňkách budou které částice sledovány a karty PHYS, udávající maximální energii částic a pro fotony i zapnutí fotojaderné fyziky. Karta SDEF slouží k definici zdroje částic. Ve všech případech v této práci se jedná o gaussovský paprsek protonů s energií 660 MeV. Následují skupiny tzv. tally cards, které specifikují typ informace požadovaný na výstupu. Tallies v práci sledují hustotu neutronového toku a jsou popsány v následujících podkapitolách. Vypočtené hodnoty jsou normovány na jednu částici zdroje<sup>4</sup>.

### 4.2.1 CMESH

CMESH v rámci výpočtů slouží ke grafickému zobrazení hustoty toku neutronů. Součástí simulace je nezávislá válcová síť (mesh), ve které jsou sledovány neutrony, vznikající v rámci výpočtu. Pro každý terč byla sledována hustota neutronového toku v celém energetickém spektru (0-700 MeV) a také v intervalech energií 0-7 MeV, 7-15 MeV, 15-25 MeV a 25-700 MeV.

Intervaly byly zvoleny na základě účinných průřezů pro štěpení  $^{235}\text{U}$  (energie vyšší než 7 MeV) a pro reakce (n, 3n) na  $^{232}\text{Th}$  a  $^{238}\text{U}$  (na intervalu 15-25 MeV), viz Obr. 22 [91].



Obr. 22 Účinné průřezy pro štěpení  $^{238}\text{U}$  a reakce (n, 3n) na  $^{232}\text{Th}$  a  $^{238}\text{U}$ . [91]

<sup>4</sup> Pro určení skutečné hustoty neutronového toku by bylo třeba vynásobit výsledné hodnoty počtem protonů emitovaných zdrojem za 1s.

### 4.2.2 Tally F4

Tally F4 byla použita podle rovnice

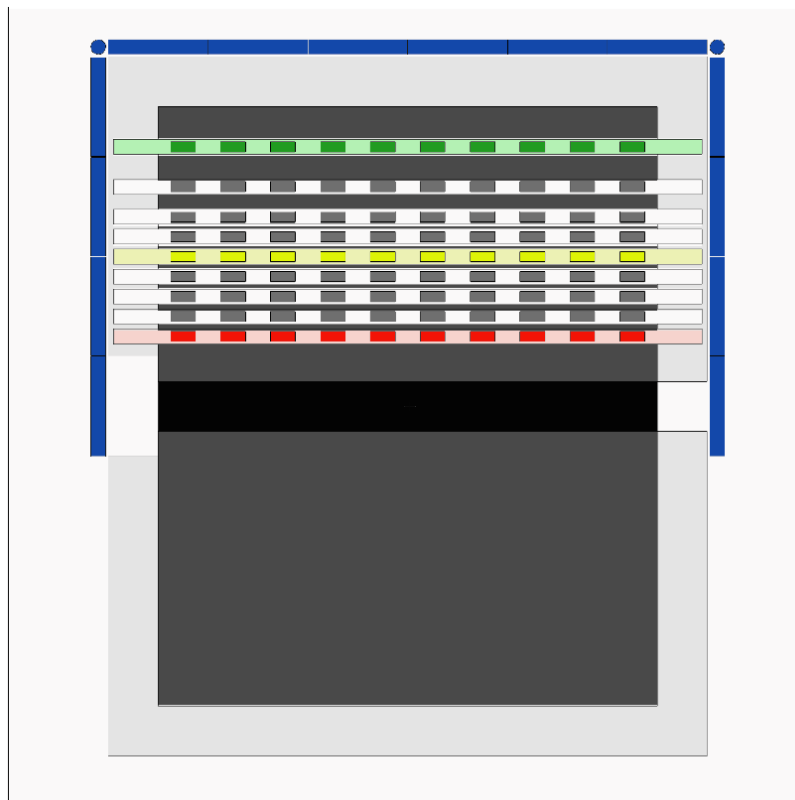
$$F_4 = \frac{1}{V} \iiint \Phi(\mathbf{r}, E, t) dE dt dV, \quad (4.1)$$

kde  $V$  ( $\text{cm}^3$ ) je objem dané buňky,  $\mathbf{r}$  (cm) je polohový vektor částice,  $E$  (MeV) je energie částice,  $t$  (s) je čas a  $\phi$  ( $1/\text{cm}^2\text{s}$ ) je hustota neutronového toku. Díky tomu, že zdroj protonů není časově závislý, výsledná hodnota odpovídá střední hodnotě neutronového toku v jednotlivých objemech (buňkách) a jednotkou je  $1/\text{cm}^2\text{s}$ . [89]

Pomocí karty E0 bylo využito rozdělení podle energií na neutrony:

- 0-0,002 eV – chladné,
- 0,002-0,5 eV – tepelné,
- 0,5- $10^3$  eV – rezonanční,
- 1-500 keV – středních energií,
- 0,5-10 MeV – rychlé,
- 10-50 MeV – vysokých energií,
- 50-700 MeV – velmi vysokých energií.

Výpočty byly provedeny pro detektory a také pro měření úniku (buňky vyplněné vzduchem po obvodu ocelového stínění). Z vypočtených hodnot byly pro detektory v experimentálních kanálech vzdálených 14, 30 a 52 cm od osy válce sestaveny histogramy, znázorňující rozdělení střední hustoty neutronového toku podle energie. Skupiny detektorů, pro které byly histogramy sestaveny, jsou zvýrazněny na Obr. 23.



Obr. 23 Skupiny buněk v tallies F4. Měření úniku (modrá) a detektory v kanálech vzdálených 14 cm (červená), 30 cm (žlutá) a 52 cm (zelená) od osy válce.



Poslední skupinou karet jsou definice použitých materiálů, obsahujících číslo materiálu, číslo ZAID specifikující použitý izotop případně prvek a hmotnostní poměr, v jakém je v materiálu daný izotop zastoupen. [90]

Hustoty materiálů byly převzaty z publikace [92]. Všechny simulace byly provedeny pro  $10^6$  částic emitovaných zdrojem. Doba výpočtu na osobním počítači Lenovo s procesorem Intel Pentium G4400T 2.90GHz se pohybovala mezi 9-10 hodinami.

Pro výpočty v byla použita verze programu MCNP6.2. Grafické výstupy byly vykresleny ze souborů RUNTPE prostřednictvím MCNP plotteru, spuštěného přes server Xming. Vstupní INP a výstupní OUTP soubory pro jednotlivé výpočty se nachází na přiloženém CD.

### 4.3 Těžké terče

Pro výpočty byly zvoleny tyto materiály těžkých terčů: Bi, Pb, Ta, Th, U, UO<sub>2</sub> a W. Hustoty těchto materiálů jsou uvedeny v Tab. 1. Grafické výstupy pro jednotlivé terče obsahuje Příloha A.

Tab. 1 Hustota materiálů těžkých terčů.

Materiál	Bi	Pb	Ta	Th	U <sup>5</sup>	UO <sub>2</sub>	W
Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	9,780	11,350	16,654	11,720	18,950	10,960	19,300

Při srážce protonů s jádry těžkých prvků dochází ke spalačním reakcím, výsledkem čehož je velká produkce neutronů. Jak je vidět například na Obr. 24 a) – g), neutronová spektra jednotlivých terčů jsou si podobná. V první třetině terče a jejím okolím nabývá hustota toku neutronů maximálních hodnot. Její hodnota se vzdáleností od místa spojení urychlovače s terčem klesá, v nejvzdálenějších oblastech aktivní zóny se jedná o pokles až o 5 řádů oproti maximu. Terč z UO<sub>2</sub> (případ f)) se výrazně liší od ostatních těžkých terčů tím, že maximální hodnoty jsou v jeho případě o řád nižší.

U terčů z těchto materiálů dochází k výraznému úniku neutronů v přední části zařízení. Oproti tomu boční a zadní únik je minimální.

Z porovnání hustot toků neutronů pro různé intervaly energií plyne, že neutrony s energiemi v intervalu 0-7 MeV (na Obr. 25 a) – g)) tvoří většinu, nejméně je neutronů s energiemi v rozmezí 15-25 MeV (na Obr. 27 a) – g)).

Při porovnání grafů na Obr. 29 až Obr. 31 je patrné, že extrémy nastávají pro terče z uranu a UO<sub>2</sub>, pro ostatní terče jsou výsledky takřka shodné. V oblasti pomalých neutronů nastává maximum hustoty neutronového toku u terče z UO<sub>2</sub>. U výsledků při vyšších energiích se ale ukazuje, že nejvyšší hustoty neutronového toku bylo dosaženo při využití terče z uranu, a proto byl zvolen jako vhodný materiál pro další výpočty. Zároveň při vyšších energiích na uranovém terči dochází i k největšímu úniku neutronů (viz Obr. 32). Jak je z grafů patrné, rozdíly mezi jednotlivými materiály se zmenšují se vzdáleností od terče.

<sup>5</sup> Přírodní uran s 0.7% <sup>235</sup>U a 0.006% <sup>234</sup>U.

## 4.4 Lehké terče

Pro výpočty s lehkými terči byly vybrány materiály B, B<sub>4</sub>C, Be, C, FLiBe (v poměru LiF a BeF<sub>2</sub> 2:1) a Li. Hustoty jednotlivých materiálů jsou uvedeny v Tab. 2. Příloha B zobrazuje jednotlivé grafické výstupy. Při výpočtech s terčem z Be docházelo v MCNP k chybě související s knihovnou účinných průřezů, v důsledku čehož byl výpočet předčasně ukončen. Terč z Bi nebyl do porovnání zahrnut.

Tab. 2 Hustota materiálů lehkých terčů.

Materiál	B	B <sub>4</sub> C	Be	C	FLiBe	Li
Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	2,370	2,520	1,848	1,700	2,289	0,534

V případě srážek protonů a lehkých jader nedochází ke spalačním reakcím a produkce neutronů je menší než v případě těžkých terčů. Při pohledu na Obr. 33 a) – e) je zřejmé, že neutronová spektra jsou si opět podobná. Hustota neutronového toku u lehkých terčů dosahuje maxima v blízkosti ve středu terče, směrem k okrajům zařízení klesá, v oblasti aktivní zóny asi o tři řády.

K výraznému úniku při použití lehkých terčů dochází jak v přední, tak i v zadní části zařízení, oproti tomu je únik po stranách zanedbatelný. Nejvýraznější únik ze zadní části zařízení lze pozorovat při využití terče z lithia (na Obr. 33 e)).

Hustota toku neutronů je největší pro energie neutronů z intervalu 0-7 MeV (Obr. 34 a) – e)), nejmenší při energiích 15-25 MeV (Obr. 36 a) – e)), stejně jako u těžkých terčů.

Jak je vidět i z grafů na Obr. 38 až Obr. 40, nejvyšší hustoty neutronového toku bylo dosaženo při využití terče z bóru, velmi blízké hodnoty byly vypočteny i pro terč z B<sub>4</sub>C a FLiBe. Dochází u nich i k největšímu úniku neutronů (viz Obr. 41). Naopak nejmenší hodnoty byly vypočteny pro terč z lithia. Jako materiál pro kombinované terče byl vybrán bór.

## 4.5 Kombinované terče

Jako materiály pro kombinované terče byly z výše uvedených důvodů vybrány materiály uran a bór. Jednotlivé kombinace byly rozděleny na čtyři skupiny podle způsobu sestavení výsledného terče.

### 4.5.1 Kombinace B/U 1:1

Při tomto způsobu sestavení byl terč ve všech případech tvořen válci z uranu a bóru o stejných rozměrech, kdy přední část terče tvořil válec z bóru. Výpočty byly provedeny pro délky jednotlivých válců 25 cm, 10 cm, 5 cm, 2 cm a 1 cm. Příloha C zahrnuje příslušné grafické výstupy.

Maximální hustoty neutronového toku bylo dosaženo na dílech z uranu v přední části terče, maximální pokles v rámci aktivní zóny byl o čtyři řády (viz Obr. 42 a) – e)).

Únik z přední části zařízení byl opět výrazný. Jak je patrné z grafu na Obr. 50, se zkracováním délky válců docházelo k většímu úniku.

K porovnání byl dle grafu na Obr. 47 vybrán terč sestavený z dílů o tloušťce 1 cm.

### 4.5.2 Kombinace U/B 1:1

Způsob sestavení terče byl stejný jako v kapitole 4.5.1, v přední části terče byl vždy první válec z uranu. Výpočty byly opět provedeny pro délky jednotlivých válců 25 cm, 10 cm, 5 cm, 2 cm a 1 cm. Výsledky výpočtů pro tyto terče se nacházejí v Příloha D.

Stejně jako u předchozích kombinací bylo maxima dosaženo v přední části terče na dílech tvořených uranem, což lze pozorovat např. na Obr. 51 a) – e). Jednotlivé kombinace se od sebe téměř neliší, nejvýraznější rozdíl lze pozorovat při úniku ze zařízení (dle grafu na Obr. 59), který klesá s klesající délkou válců.

### 4.5.3 Kombinace B/U 5/1

Kombinace byla zvolena na základě faktu, že vzdálenost, na které je proton úplně zastaven je větší pro bór než pro uran. Terč je tvořen válci z bóru o délce 5 cm a válci z uranu o délce 1 cm. Příloha E obsahuje výsledky pro tuto kombinaci.

Jak je patrné z Obr. 60 a) – e), kombinace se vyznačuje rozložením hustoty neutronového toku podobným jako u lehkých terčů, díky uranovým částem v první polovině terče bylo dosaženo vyšších hodnot v zařízení a zároveň menšího úniku z koncové části.

### 4.5.4 Diborid uranu

Terč z UB<sub>2</sub> byl zvolen za účelem simulace homogenní směsi uranu a bóru. Hustota materiálu je 12.70 g/cm<sup>3</sup> podle [93]. Příslušné grafické výstupy obsahuje Příloha F. Hustota neutronového toku při využití homogenního terče je velmi podobná výsledkům s těžkými terči, což je patrné z Obr. 61 a) – e).

Následující kapitola se věnuje vzájemnému porovnání jednotlivých typů terčů.

## 4.6 Porovnání

Pro závěrečné porovnání byly vybrány následující terče:

- Uran (případ e na Obr. 24 až Obr. 28).
- Bór (případ a na Obr. 33 až Obr. 37).
- Kombinace B/U, složená z 1 cm silných válců (dále B/U) (případ e na Obr. 42 až Obr. 46).
- Kombinace U/B, složená z 1 cm silných válců (dále U/B) (případ e na Obr. 51 až Obr. 55).
- Kombinace B/U složená z 5 cm B a 1 cm U (dále B(5)/U(1)) (na Obr. 60).
- Diborid uranu (dále UB<sub>2</sub>) (na Obr. 61).

Příloha G obsahuje příslušné grafy.

V rámci celého neutronového spektra bylo kombinací obou materiálů dosaženo rovnoměrnějšího rozložení hustoty neutronového toku oproti uranovému terči. Zároveň došlo ke zvýšení maxima a snížení úniku v zadní části oproti terči z bóru.

Co se týče neutronů s energií nad 7 MeV, přidáním bóru sice poklesla maximální hustota neutronového toku, došlo ale k jejímu navýšení v okolí středu terče. Nejnižších hodnot bylo dosaženo při energii neutronů v rozmezí 15-25 MeV a to u všech zkoumaných variant.

Z grafů na Obr. 62 - Obr. 64 plyne, že z kombinovaných terčů se jako nejméně vhodná jeví kombinace B(5)/U(1), u ostatních kombinací byla střední hustota neutronového toku v detektorech

---

velmi blízká čistě uranovému terči. V některých případech dokonce výsledky pro kombinace U/B, a UB<sub>2</sub> vykazují lepší výsledky než čistě uranový terč.

K největšímu úniku dle grafu na Obr. 65 dochází na čistě uranovém terči ve všech intervalech energického spektra. Rozdíl mezi hustotou neutronového toku při úniku v případě uranového terče a při využití terčů kombinovaných je výraznější, než rozdíly v rámci aktivní zóny.

## 5. ZÁVĚR

Urychlovačem řízené systémy jsou jedním z možných budoucích řešení nakládání s vyhořelým jaderným palivem. Jelikož jde o složitá zařízení, je třeba před započítáním výstavby pro průmyslové využití rozsáhlý výzkum. Již od devadesátých let v různých částech světa probíhá řada experimentů, jejichž záměrem je získat data pro návrh optimálního ADS zařízení. Požadavků na ADS při tom není málo.

Terč musí být dostatečně odolný vůči tepelnému i dalšímu namáhání. Zároveň na něm musí docházet k produkci dostatečného počtu neutronů. Terče pro ADS se v experimentech objevují v nejrůznějších variantách. Nejčastěji se jedná o olovo, případně eutektikum Pb-Bi, plánované v případě belgického projektu MARRHA-FASTEF. Dále se objevují například terče z wolframu (jako u granulového terče čínského CIADS) nebo z uranu (v případě amerického GEM\*STAR).

Při dimenzování urychlovače je třeba zvolit takovou konfiguraci, aby byl neutronový výtěžek co největší, a zároveň, aby energie dodaná urychlovači byla co nejmenší. Již první experimenty (například FEAT švýcarského CERNu) prokázaly, že optimální neutronový výtěžek nastává při energiích protonů větších než 900 MeV. V experimentech můžeme narazit jak na lineární urychlovače, tak na cyklotrony. Pokud bude součástí spojení urychlovače s terčem okénko, je třeba zvolit takový materiál, aby odolal extrémním podmínkám, ale současně aby neodrážel nepřípustně velké množství urychlených protonů. Při využití bezokénkového terče hrozí narušení vakua v urychlovači.

Použité palivo závisí na účelu výstavby zařízení, výzkum probíhá jak pro reaktory s thoriovým palivem, tak pro reaktory využívající palivo MOX. V obou případech se uvažují příměsi MA a LLFP, určené k transmutaci. V potaz je bráno využití pevného paliva v kombinaci s vhodným chlazením, nebo paliva ve formě tekutých solí.

Praktická část práce byla zaměřena na optimalizaci neutronového spektra pomocí změn materiálu terče zařízení BURAN, nacházejícího se v JINR v ruské Dubně. Pomocí programu MCNP byla provedena řada výpočtů pro terče tvořené jedním materiálem a pro terče kombinované, vytvořené kombinací lehkého a těžkého materiálu. V rámci těchto výpočtů byly pro kombinované terče vybrány uran a bór, z důvodu nejvyšší hustoty neutronového toku v porovnání s ostatními materiály dané skupiny.

Výsledky simulací ukazují, že maximálních hodnot hustoty neutronového toku bylo dosaženo při využití čistě uranového terče. Maxima bylo dosaženo v první třetině terče a jejím okolí. V dalších částech terče docházelo k poklesu až o pět řádů. Oproti tomu u terče z bóru byla hustota neutronového toku rozložena rovnoměrněji v rámci celého zařízení, maximum však dosahovalo o řád menších hodnot než v případě uranového terče.

Při využití vhodné kombinace uranu s bórem došlo ke zlepšení rozložení hustoty neutronového toku v aktivní zóně zařízení v celém neutronovém spektru. Jako nejvýhodnější kombinace se dle provedených výpočtů jeví využití homogenní směsi  $UB_2$ , případně rozdělení terče na 1 cm silné střídající se válce bóru a uranu. U zmíněných kombinací došlo spolu se zrovnoměrněním také k nejmenšímu poklesu hustoty neutronového toku. Jako nejméně výhodná varianta vychází kombinace, u které se střídají 5 cm silné válce bóru s 1 cm silnými válci uranu.

Problémem všech provedených simulací byl únik neutronů ze systému. Po stranách zařízení k úniku téměř nedocházelo díky rozměrům aktivní zóny tvořené ochuzeným uranem i díky ocelovému stínění na okrajích. K úniku ze zadní části docházelo zejména při použití lehkých

---

materiálů, u kterých metr dlouhý terč nestačí k zabrzdění neutronů. Zadní únik byl u kombinovaných terčů minimalizován přidáním těžkého materiálu. Problematictější se jeví únik neutronů z přední části zařízení, který se podařilo částečně snížit použitím kombinovaného terče, jehož přední část tvořil bór. Dosažené snížení úniku je stále nedostačující. Řešením této situace by mohla být změna geometrie stínění a vhodné spojení urychlovače s terčem.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *World Nuclear Association* [online]. United Kingdom, 2018 [cit. 2019-01-01]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org>
- [2] *Status of Accelerator Driven Systems Research and Technology Development*. Vienna: IAEA, 2015, 376 s. ISBN 978-92-0-105315-2. ISSN 1011-4289. IAEA-TECDOC-1766. Dostupné také z: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1766\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1766_web.pdf)
- [3] *Safety Issues Associated with Plutonium Involvement in the Nuclear Fuel Cycle* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1999 [cit. 2019-05-24]. ISBN 978-0-7923-5593-9. Dostupné z: [http://link.springer.com/10.1007/978-94-011-4591-6\\_10](http://link.springer.com/10.1007/978-94-011-4591-6_10)
- [4] *Accelerator Driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles: A Comparative Study* [online]. OECD, 2002, 350 s. [cit. 2019-01-06]. ISBN 9264184821. Dostupné z: <https://www.oecd-neo.org/ndd/reports/2002/nea3109-ads.pdf>
- [5] KRÁSA, Antonín. *Neutron Production in Spallation Reactions of Relativistic Light Ions on Thick, Heavy Targets* [online]. Prague, 2006 [cit. 2019-02-04]. Dostupné z: <https://ojs.ujf.cas.cz/~wagner/transmutace/diplomky/studiekrasa.pdf>. Report for the PhD State Exam. Czech Technical University in Prague. Vedoucí práce RNDr. Vladimír Wagner, CSc.
- [6] Průběh tříštvivé reakce. In: *Ústav Jaderné Fyziky AV ČR* [online]. ÚJV Řež [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://ojs.ujf.cas.cz/~wagner/transmutace/uvod/uvodcz.html>
- [7] *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* [online]. 2001, **463**(3) [cit. 2019-01-01]. ISSN 01689002. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900201001607>
- [8] ABDERRAHIM, H. A. et al. *Accelerator and Target Technology for Accelerator Driven Transmutation and Energy Production*. 2010, 23 s. FERMILAB-FN-0907-DI. Dostupné také z: <https://pdfs.semanticscholar.org/55e9/b442e7b189a4f31fefa6939ce3387d0c47b7.pdf>
- [9] SHULTIS, J. Kenneth a Richard E. FAW. *Fundamentals of nuclear science and engineering*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2008. ISBN 14-200-5135-0.
- [10] *Status of minor actinide fuel development* [online]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2009 [cit. 2019-01-06]. ISBN 978-92-0-106909-2. ISSN 1995-7807. Dostupné z: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1415\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1415_web.pdf)
- [11] CHIBA, Satoshi, Toshio WAKABAYASHI, Yoshiaki TACHI, Naoyuki TAKAKI, Atsunori TERASHIMA, Shin OKUMURA a Tadashi YOSHIDA. Method to Reduce Long-lived Fission Products by Nuclear Transmutations with Fast Spectrum Reactors. *Scientific Reports* [online]. 2017, **7**(1) [cit. 2019-01-06]. DOI: 10.1038/s41598-017-14319-7. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <http://www.nature.com/articles/s41598-017-14319-7>
- [12] Chapter 11 Accelerators. *Nuclear Science—A Guide to the Nuclear Science Wall Chart* [online]. CPEP, 2018, 11: 1-5 [cit. 2018-11-29]. Dostupné z: <http://www2.lbl.gov/abc/wallchart/teachersguide/pdf/NuclearTeachersGuide-2018.pdf>
- [13] REVOL, Jean-Pierre. *Accelerator-Driven Systems (ADS) Physics and Motivations. Thorium Energy for the World* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2016,

- 2016-04-05, 235-242 [cit. 2018-11-20]. DOI: 10.1007/978-3-319-26542-1\_35. ISBN 978-3-319-26540-7. Dostupné z: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-26542-1\\_35](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-26542-1_35)
- [14] TOLSTOV, K.D. Some peculiarities of relativistic nucleus collisions. In: *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements* [online]. 1991, **19**(1-4), s. 657-664 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1016/1359-0189(91)90288-S. ISSN 13590189. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/135901899190288S>
- [15] CARMINATI, F. et al. *An energy amplifier for cleaner and inexhaustible nuclear energy production driven by a particle beam accelerator* [online]. s. 1-47 [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <https://cds.cern.ch/record/256520/files/at-93-047>
- [16] ANDRIAMONJE, S., A. ANGELOPOULOS, A. APOSTOLAKIS, et al. Experimental determination of the energy generated in nuclear cascades by a high energy beam. *Physics Letters B* [online]. 1995, **348**(3-4), 697-709 [cit. 2019-01-03]. DOI: 10.1016/0370-2693(95)00154-D. ISSN 03702693. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/037026939500154D>
- [17] ABÁNADES, A, J ALEIXANDRE, S ANDRIAMONJE, et al. Results from the TARC experiment: spallation neutron phenomenology in lead and neutron-driven nuclear transmutation by adiabatic resonance crossing. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2002, 2016-04-05, 478(3), s. 577-730 [cit. 2018-11-20]. DOI: 10.1016/S0168-9002(01)00789-6. ISBN 978-3-319-26540-7. ISSN 01689002. Dostupné z: [http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900201007896Nemea4-BLAZKA\\_ATD](http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900201007896Nemea4-BLAZKA_ATD)
- [18] ZEMAN, Miroslav, Jindrich ADAM, Karel KATOVSKY, et al. Current research on ADS at the Joint Institute for Nuclear Research. In: *Proceedings of 4th Workshop on ADS and thorium — PoS(ADST2016)* [online]. Trieste, Italy: Sissa Medialab, 2017, 2017-02-23, s. 1-12 [cit. 2018-11-29]. DOI: 10.22323/1.279.0013. Dostupné z: <https://pos.sissa.it/279/013>
- [19] ZAMANI, M, M FRAGOPOULOU, M MANOLOPOULOU, et al. Experience gained during 10 years transmutation experiments in Dubna. In: *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2006, **41**, s. 475-483 [cit. 2019-01-22]. DOI: 10.1088/1742-6596/41/1/053. ISSN 1742-6588. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1742-6596/41/i=1/a=053?key=crossref.f3736cc85ce58a866384ee982f3280da>
- [20] AÏT ABDERRAHIM, Hamid, M. WOHLMUTHER, Y. DAI, et al. MYRRHA: A Flexible and Fast-Spectrum Irradiation Facility. *Thorium Energy for the World* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2016, 2016-04-05, , 89-96 [cit. 2018-11-20]. DOI: 10.1007/978-3-319-26542-1\_13. ISBN 978-3-319-26540-7. Dostupné z: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-26542-1\\_13](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-26542-1_13)
- [21] FURRER, Albert. The Swiss Spallation Neutron Source SINQ: From Idea to Realization. *Swiss Neutron News* [online]. 2017, (49), 6-17 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: [https://sgn.web.psi.ch/sgn/snn/snn\\_49.pdf](https://sgn.web.psi.ch/sgn/snn/snn_49.pdf)
- [22] KLUG, Joakim, Jan BLOMGREN, Ayse ATAÇ, et al. SCANDAL - A Facility for Elastic Neutron Scattering Studies in the 50–130 MeV Range. *Journal of Nuclear Science and Technology* [online]. 2014, **39**(sup2), 661-664 [cit. 2018-11-24]. DOI:



- 10.1080/00223131.2002.10875186. ISSN 0022-3131. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00223131.2002.10875186>
- [23] BLOMGREN, Jan. *Partitioning and transmutation Current developments – 2010 A report from the Swedish reference group for P&T-research* [online]. Technical Report TR-10-35. Svensk Kärnbränslehantering AB, 2010 [cit. 2018-12-01]. Dostupné z: [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:41049776](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:41049776)
- [24] LE GENTIL, E., M. BÖHMER, A. LAFRIAKH, et al. Exclusive measurements on at 1AGev with the SPALADIN setup at GSI. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* [online]. 2006, **562**(2), 743-746 [cit. 2018-11-21]. DOI: 10.1016/j.nima.2006.02.037. ISSN 01689002. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900206002725>
- [25] *A European roadmap for developing accelerator driven system (ADS) for nuclear waste incineration* [online]. Roma: ENEA, 200, s. 89-91 [cit. 2018-11-20]. ISBN 88-8286-008-6. Dostupné z: <https://www.oecd-neo.org/pt/docs/ADS%20ROADMAP.pdf>
- [26] CIAVOLA, G., L. CELONA, S. GAMMINO, F. CHINES, S. PASSARELLO a C. CAMPISANO. First beam from the TRASCO intense proton source (TRIPS) at INFN-LNS. In: *PACS2001. Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference (Cat. No.01CH37268)* [online]. IEEE, 2001, s. 2406-2408 [cit. 2019-01-22]. DOI: 10.1109/PAC.2001.987398. ISBN 0-7803-7191-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/987398/>
- [27] RUBBIA, C. et. al. The TRADE Experiment: Status of the Project and Physics of the Spallation Target. *PHYSOR 2004: The Physics of Fuel Cycles and Advanced Nuclear Systems: Global Developments* [online]. 2004, s. 1-21 [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/physor/2004/PHYSOR04/papers/96060.pdf>
- [28] WESTMEIER, Wolfram, R. BRANDT, E.-J. LANGROCK, et al. Transmutation experiments on <sup>129</sup>I, <sup>139</sup>La and <sup>237</sup>Np using the Nuclotron accelerator. *Radiochimica Acta* [online]. 2005, **93**(2), 65-73 [cit. 2018-11-27]. DOI: 10.1524/ract.93.2.65.59415. ISSN 2193-3405. Dostupné z: <http://www.degruyter.com/view/j/ract.2005.93.issue-2/ract.93.2.65.59415/ract.93.2.65.59415.xml>
- [29] ADAM, J. et al. Study of deep subcritical electronuclear systems and feasibility of their application for energy production and radioactive waste transmutation. [online]. Dubna: JINR, 2010, 21 s. Report Number: JINR-E--1-2010-61. Dostupné také z: <http://www1.jinr.ru/Preprints/2010/061%28E1-2010-61%29.pdf>
- [30] *Cross-section measurements of neutron threshold reactions using activation method* [online]. In: . [cit. 2019-01-22]. Dostupné z: [http://ojs.ujf.cas.cz/~wagner/transmutace/erinda/presentations/27-Svoboda\\_ERINDA.pdf](http://ojs.ujf.cas.cz/~wagner/transmutace/erinda/presentations/27-Svoboda_ERINDA.pdf)
- [31] GUSTOV, S. A. et al. Design Status and Future Research Programme for a Sub-critical Assembly Driven by a Proton Accelerator with Proton Energy 660 MeV for Experiments on Long-lived Fission Products and Minor Actinides Transmutation (SAD). In: *Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation: Seventh Information Exchange Meeting, Jeju, Republic of Korea, 14-16 October 2002* [online]. NEA, 2003, s. 909-916 [cit. 2018-11-27]. ISBN 92-64-02125-6. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/6498/9f232f57e4c254eb85c4abaf2bf21e4cb37f.pdf>

- [32] RATAJ, J. et. al. The CTU subcritical assembly BLAŽKA driven by the NPI cyclotron-based external neutron source. In: *NEMEA-4 Neutron Measurements, Evaluations and Applications: Nuclear data needs for Generation-IV and accelerator driven systems* [online]. Belgium: Office for Official Publications of the European Communities, 2008, s. 83-86 [cit. 2018-11-21]. DOI: 10.2787/13092. ISBN 978-92-79-08274-0. ISSN 1018-5593. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/38618276.pdf>
- [33] V, Belikov O, Belozarov A V, Becher YU, et al. Physical start-up of the first stage of IREN facility. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2010, **205** [cit. 2018-12-20]. DOI: 10.1088/1742-6596/205/1/012053. ISSN 1742-6596. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1742-6596/205/i=1/a=012053?key=crossref.3333f46e8264341e9e93a793af9fa6db>
- [34] HAAS, Didier, Roger GARBIL a Michel HUGON. The European activity on ADS: The EURATOM Research Framework Programme. In: *Technology and Components of Accelerator-driven Systems: Second International Workshop Proceedings Nantes, France 21-23 May 2013* [online]. OECD, 2015, s. 25-29 [cit. 2018-12-02]. Nuclear Science NEA/NSC/DOC(2015)7. Dostupné z: <https://www.oecd-neo.org/science/docs/2015/nsc-doc2015-7.pdf>
- [35] KONING, Arjan, Hans BEIJERS, Jose BENLLIURE, et al. HINDAS A European Nuclear Data Program for Accelerator-Driven Systems. In: *Journal of Nuclear Science and Technology* [online]. 2014, **39**(sup2), s. 1161-1166 [cit. 2018-11-30]. DOI: 10.1080/00223131.2002.10875308. ISSN 0022-3131. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00223131.2002.10875308>
- [36] GUERRERO, C., A. TSINGANIS, E. BERTHOUMIEUX, et al. *The European Physical Journal A* [online]. 2013, **49**(2) [cit. 2018-11-26]. DOI: 10.1140/epja/i2013-13027-6. ISSN 1434-6001. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1140/epja/i2013-13027-6>
- [37] ALAMO, Ana. *Irradiation effects in martensitic steels under neutron and proton mixed spectrum: SPIRE*. Cordis, 2002, 74 s. N°FIKW – CT – 2000 - 00058. Dostupné také z: [https://cordis.europa.eu/docs/projects/files/FIKW/FIKW-CT-2000-00058/100099371-6\\_en.pdf](https://cordis.europa.eu/docs/projects/files/FIKW/FIKW-CT-2000-00058/100099371-6_en.pdf)
- [38] PETROVICH, Carlo. *Evaluation of spallation products in Pb/Bi cooling systems of ADS-DF*. ENEA, 2002, 21 s. DOI: 10.13140/RG.2.2.20026.39365, Report number: FIS-130-001. Dostupné také z: [https://www.researchgate.net/publication/315785489\\_Evaluation\\_of\\_spallation\\_products\\_in\\_PbBi\\_cooling\\_systems\\_of\\_ADS-DF](https://www.researchgate.net/publication/315785489_Evaluation_of_spallation_products_in_PbBi_cooling_systems_of_ADS-DF)
- [39] LATGE, Ch., M. WOHLMUTHER, Y. DAI, et al. MEGAPIE: The World's First High-Power Liquid Metal Spallation Neutron Source. *Thorium Energy for the World* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2016, 2016-04-05, s. 279-287 [cit. 2018-11-20]. DOI: 10.1007/978-3-319-26542-1\_41. ISBN 978-3-319-26540-7. Dostupné z: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-26542-1\\_41](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-26542-1_41)
- [40] Megapie: Megawatt pilot experiment. *Institute of research into the fundamental laws of the Universe: Fundamental Research Division* [online]. France: PHoCEA, 12/06 2013 [cit. 2019-01-23]. Dostupné z: [http://irfu.cea.fr/en/Phoce/Vie\\_des\\_labos/Ast/ast\\_technique.php?id\\_ast=2254](http://irfu.cea.fr/en/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast_technique.php?id_ast=2254)

- [41] ARIEN, B. Computational fluid dynamics applied to heavy liquid metals: Technical meeting on use of computational fluid dynamics codes for safety analysis of nuclear reactor systems, including containment. Pisa (Italy): IAEA, 2003, 8 s. ISBN 92-0-111003-0. ISSN 1011-4289. IAEA-TECDOC--1379. Dostupné také z: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/36/103/36103090.pdf?r=1&r=1](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/36/103/36103090.pdf?r=1&r=1)
- [42] Thorium cycle: development steps for PWR and ADS applications. *CORDIS* [online]. European Union, 2018 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://cordis.europa.eu/project/rcn/52448/factsheet/en>
- [43] D'HONDT, Pierre a Bernard CARLUEC. The European Project PDS-XADS "preliminary Design Studies of an Experimental Accelerator-Driven System". In: *Utilisation and Reliability of High Power Proton Accelerators* [online]. OECD Publishing, 2005, 2005-10-31, s. 113-124 [cit. 2018-12-03]. Nuclear Science. DOI: 10.1787/9789264013810-12-en. ISBN 9789264013803. Dostupné z: [http://www.oecd-ilibrary.org/nuclear-energy/utilisation-and-reliability-of-high-power-proton-accelerators/the-european-project-pds-xads-preliminary-design-studies-of-an-experimental-accelerator-driven-system\\_9789264013810-12-en](http://www.oecd-ilibrary.org/nuclear-energy/utilisation-and-reliability-of-high-power-proton-accelerators/the-european-project-pds-xads-preliminary-design-studies-of-an-experimental-accelerator-driven-system_9789264013810-12-en)
- [44] RIMPAULT, G. et al. *General Synthesis Report of the Different ADS Design Status. Establishment of a Catalogue of the R&D needs*. France: EURATOM, 2010, 233 s. hal-01084509. Dostupné také z: [https://www.researchgate.net/publication/278630256\\_General\\_Synthesis\\_Report\\_of\\_the\\_Different\\_ADS\\_Design\\_Status\\_Establishment\\_of\\_a\\_Catalogue\\_of\\_the\\_RD\\_needs/citation\\_s](https://www.researchgate.net/publication/278630256_General_Synthesis_Report_of_the_Different_ADS_Design_Status_Establishment_of_a_Catalogue_of_the_RD_needs/citation_s)
- [45] DE BRUYN, Didier J. et al. Achievements and lessons learned within the Domain 1 "DESIGN" of the IP EUROTRANS Integrated Project. In: *Technology and Components of Accelerator-driven Systems* [online]. OECD Publishing, 2011 [cit. 2018-11-29]. DOI: 10.1787/9789264117297-en. ISBN 9789264117273. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/266710538\\_Achievements\\_and\\_lessons\\_learned\\_within\\_the\\_Domain\\_1\\_DESIGN\\_of\\_the\\_IP\\_EUROTRANS\\_Integrated\\_Project](https://www.researchgate.net/publication/266710538_Achievements_and_lessons_learned_within_the_Domain_1_DESIGN_of_the_IP_EUROTRANS_Integrated_Project)
- [46] DE BRUYN, D. et al. The Fast-spectrum Transmutation Experimental Facility FASTEF: Main Design Achievements (Part 1: Core & Primary System) Within The FP7-CDT Collaborative Project Of The European Commission. In: *Proceedings of ICAPP '12: Chicago, USA, June 24-28, 2012* [online]. Chicago, USA, 2012 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/264422671\\_The\\_Fast-spectrum\\_Transmutation\\_Experimental\\_Facility\\_FASTEF\\_Main\\_Design\\_Achievements\\_Part\\_1\\_Core\\_Primary\\_System\\_Within\\_The\\_FP7-CDT\\_Collaborative\\_Project\\_Of\\_The\\_European\\_Commission](https://www.researchgate.net/publication/264422671_The_Fast-spectrum_Transmutation_Experimental_Facility_FASTEF_Main_Design_Achievements_Part_1_Core_Primary_System_Within_The_FP7-CDT_Collaborative_Project_Of_The_European_Commission)
- [47] PERSSON, Carl-Magnus, Per SELTBORG, Alexandra ÅHLANDER, et al. Analysis of reactivity determination methods in the subcritical experiment Yalina. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* [online]. 2005, **554**(1-3), 374-383 [cit. 2018-11-24]. DOI: 10.1016/j.nima.2005.07.058. ISSN 01689002. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900205015317>
- [48] MAIORINO, J. R. et al. The Participation of IPEN in the IAEA Coordinated Research Projects on Accelerator Driven Systems (ADS). In: *2007 International Nuclear Atlantic*

- Conference - INAC 2007* [online]. Brazil: ABEN, 2007, s. 1-9 [cit. 2019-01-18]. ISBN 978-85-99141-02-1. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/228883468\\_The\\_Participation\\_of\\_IPEN\\_in\\_the\\_IAEA\\_Coordinated\\_Research\\_Projects\\_on\\_Accelerator\\_Driven\\_Systems\\_ADS](https://www.researchgate.net/publication/228883468_The_Participation_of_IPEN_in_the_IAEA_Coordinated_Research_Projects_on_Accelerator_Driven_Systems_ADS)
- [49] BAYLAC, M. et al. Operation of the versatile accelerator driving the low power ADS GUINEVERE at SCK•CEN. *Proceedings of LINAC2014* [online]. s. 659-661 [cit. 2018-11-20]. ISBN 978-3-95450-142-7. Dostupné z: <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/linac2014/papers/tupp100.pdf>
- [50] GRENECHE, D. et al. *RED-IMPACT: Impact of Partitioning, Transmutation and Waste Reduction Technologies on the Final Nuclear Waste Disposal*. 15. Jülich GmbH: Forschungszentrum, 2008, 188 s. ISBN 978-3-89336-538-8. ISSN 1866-1793. Dostupné také z: [https://www.researchgate.net/publication/30049162\\_RED-IMPACT\\_Impact\\_of\\_Partitioning\\_Transmutation\\_and\\_Waste\\_Reduction\\_Technologies\\_on\\_the\\_Final\\_Nuclear\\_Waste\\_Disposal](https://www.researchgate.net/publication/30049162_RED-IMPACT_Impact_of_Partitioning_Transmutation_and_Waste_Reduction_Technologies_on_the_Final_Nuclear_Waste_Disposal)
- [51] KOCHETKOV, A. et al. Current progress and future plans of the FREYA Project. In: *Technology and Components of Accelerator-driven Systems: Second International Workshop Proceedings Nantes, France 21-23 May 2013* [online]. OECD, 2015, s. 78-87 [cit. 2018-12-02]. Nuclear Science NEA/NSC/DOC(2015)7. Dostupné z: <https://www.oecd-neo.org/science/docs/2015/nsc-doc2015-7.pdf>
- [52] Final Report Summary: TIARA (Test Infrastructure and Accelerator Research Area). *CORDIS: Community Research and Development Information Service* [online]. France: CORDIS, 2018, 2015-06-23 [cit. 2018-12-02]. Dostupné z: [https://cordis.europa.eu/result/rcn/165425\\_en.html](https://cordis.europa.eu/result/rcn/165425_en.html)
- [53] SAMEC, K. et al. A Spallation-Based Irradiation Test Facility for Fusion and Future Fission Materials. In: *European Nuclear Conference 2014, At Marseille, France* [online]. Switzerland: CERN, 2014, 25 April 2014, s. 1-17 [cit. 2018-12-02]. DOI: 10.13140/RG.2.1.2600.7129. Dostupné z: <https://cds.cern.ch/record/1697417/files/TIARA-CONF-WP9-2014-002.pdf>
- [54] SAMEC, K., R.Ž. MILENKOVIĆ, S. DEMENTJEVS, M. ASHRAFI-NIK a A. KALT. Design of a compact high-power neutron source—The EURISOL converter target. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2009, **606**(3), s. 281-290. DOI: 10.1016/j.nima.2009.04.052. ISSN 01689002. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900209009000>
- [55] KOZODAEV, A. M., N. D. GAVRILIN, M. M. IGUMNOV, et al. Electro-nuclear neutron generator — XADS at ITEP. *Pramana* [online]. 2007, **68**(2), 243-255 [cit. 2018-11-25]. DOI: 10.1007/s12043-007-0028-2. ISSN 0304-4289. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s12043-007-0028-2>
- [56] HASHEMI-NEZHAD, S.R., N.L. ASQUITH, V.A. VORONKO, et al. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* [online]. 2018, **883** [cit. 2019-01-06]. DOI: 10.1016/j.nima.2017.11.048. ISSN 01689002. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900217312779>

- [57] ANDERSON, I.S., C. ANDREANI, J.M. CARPENTER, G. FESTA, G. GORINI, C.-K. LOONG a R. SENESI. Research opportunities with compact accelerator-driven neutron sources. In: *Physics Reports* [online]. 2016, **654**, s. 1-58 [cit. 2019-01-02]. DOI: 10.1016/j.physrep.2016.07.007. ISSN 03701573. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0370157316301958>
- [58] ARIK, M., P. S. BILGIN, A. CALISKAN, M. A. CETINER, U. KAYA, S. SULTANSOY a S. TURKOZ. A Provisional Study of ADS Within the Turkic Accelerator Complex Project. In: *Thorium Energy for the World* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2016, 2016-04-05, s. 423-424 [cit. 2018-11-25]. DOI: 10.1007/978-3-319-26542-1\_74. ISBN 978-3-319-26540-7. Dostupné z: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-26542-1\\_74](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-26542-1_74)
- [59] ZELINSKY, A. et. al. NSC KIPT Neutron Source on the Base of Subcritical Assembly With Electron Linear Accelerator Driver. In: *Proceedings, 4th International Particle Accelerator Conference (IPAC 2013): Shanghai, China, May 12-17, 2013* [online]. Geneva, Switzerland: JACoW, 2013, s. 3481-3483 [cit. 2018-11-24]. DOI: 0.18429/JACoW-IPAC2017-TUPIK034. ISBN 978-3-95450-182-3. Dostupné z: <https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/IPAC2013/papers/thpfi080.pdf>
- [60] LINANDER, Rikard. Status and Plans for the ESS Facility. In: 13th International Topical Meeting on Nuclear Applications of Accelerators 2017 (AccApp'17): The Expanding Universe of Accelerator Applications [online]. Quebec City, Canada: Curran Associates, 2017, s. 284-293 [cit. 2018-11-24]. ISBN 978-0-89448-739-2. Dostupné z: <http://accapp17.org/wp-content/2017/data/pdfs/140-23080.pdf>
- [61] SADEGHZDEH, Atefeh. *Reliability Analysis of the ESS Target Safety System* [online]. In: . 17-09-14 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: [http://accapp17.org/wp-content/uploads/2017/09/Reliability\\_Analysis\\_of\\_the\\_ESS\\_Target\\_Safety\\_System\\_AS.pdf](http://accapp17.org/wp-content/uploads/2017/09/Reliability_Analysis_of_the_ESS_Target_Safety_System_AS.pdf)
- [62] MYRRHA [online]. Belgium: Belgian Nuclear Research Centre, 2019 [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: <https://myrrha.be/>
- [63] ASHLEY, Victoria B., Roger ASHWORTH, David J. COATES a John E. EARP. The accelerator-driven thorium reactor power station. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy* [online]. 2011, **164**(3), s. 127-135 [cit. 2018-11-30]. DOI: 10.1680/ener.2011.164.3.127. ISSN 1751-4223. Dostupné z: <http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/ener.2011.164.3.127>
- [64] 3D simulation of the MYRRHA buildings. In: SCK•CEN [online]. Belgium, 2019 [cit. 2019-01-18]. Dostupné z: [https://sckcen.be/en/MediaLibrary/Pictures/MYRRHA#prettyPhoto\[gallery\]/9/](https://sckcen.be/en/MediaLibrary/Pictures/MYRRHA#prettyPhoto[gallery]/9/)
- [65] SIDORKIN, S. F., A. D. ROGOV, L. I. PONOMAREV a E. A. KOPTILOV. Proposal of the ADS Research Stand Based on the Linac of the Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences. In: *Thorium Energy for the World* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2016, 2016-04-05, s. 311-326 [cit. 2019-01-03]. DOI: 10.1007/978-3-319-26542-1\_46. ISBN 978-3-319-26540-7. Dostupné z: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-26542-1\\_46](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-26542-1_46)
- [66] VAN TUYLE, G. J. et. al. *The PHOENIX Concept: Proposed Transmutation of Long-Lived Radioactive Wastes to Produce Electric Power* [online]. USA, 1.1.1991, , 1-59 [cit. 2018-11-25]. DOI: 10.2172/6021439. Dostupné z:

- [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/22/064/22064101.pdf?r=1&r=1](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/22/064/22064101.pdf?r=1&r=1)
- [67] BOWMAN, Charles D. Basis and Objectives of the Los Alamos Accelerator Driven Transmutation Technology Project. In: *Accelerator Driven Systems: Energy Generation and Transmutation of Nuclear Waste: Status Report* [online]. Vienna: IAEA, 1997, s. 135-153 [cit. 2018-11-25]. ISSN 1011-4289. Dostupné z: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/29/022/29022018.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/29/022/29022018.pdf)
- [68] HENDERSON, S., W. ABRAHAM, A. ALEKSANDROV, et al. The Spallation Neutron Source accelerator system design. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* [online]. 2014, **763**, 610-673 [cit. 2018-11-25]. DOI: 10.1016/j.nima.2014.03.067. ISSN 01689002. Dostupné z: [https://ac.els-cdn.com/S0168900214003817/1-s2.0-S0168900214003817-main.pdf?\\_tid=a34afaf8-9a45-4c52-bc72-2f5cf5f98651&acdnat=1543151487\\_26d20e92f171634b7f0c540e39798b96](https://ac.els-cdn.com/S0168900214003817/1-s2.0-S0168900214003817-main.pdf?_tid=a34afaf8-9a45-4c52-bc72-2f5cf5f98651&acdnat=1543151487_26d20e92f171634b7f0c540e39798b96)
- [69] Modern Technology Spallation Neutron Source Target. In: *The Living Moon* [online]. Blue Knight Productions, 2016 [cit. 2019-01-22]. Dostupné z: [https://www.thelivingmoon.com/45jack\\_files/03files/Spallation\\_Neutron\\_Source\\_Target.html](https://www.thelivingmoon.com/45jack_files/03files/Spallation_Neutron_Source_Target.html)
- [70] BELLER, Dennis. *Reactor Physics Studies for the AFCI Reactor-Accelerator Coupling Experiments Project* [online]. In: . 2008, s. 58-59 [cit. 2018-11-25]. Dostupné z: [https://digitalscholarship.unlv.edu/hrc\\_trp\\_sciences\\_physics/37](https://digitalscholarship.unlv.edu/hrc_trp_sciences_physics/37)
- [71] WARIN, D. et al. The FUTURIX - transmutation experiment in Phenix. *ATALANTE 2004 conference: Advances for future nuclear fuel cycles* [online]. Nimes, Jun 2004 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/36/008/36008593.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/36/008/36008593.pdf)
- [72] GEM\*STAR: The Alternative Reactor Technology Comprising Graphite, Molten Salt, and Accelerators. In: CACUCI, D. G. *Handbook of Nuclear Engineering: Vol. 1: Nuclear Engineering Fundamentals; Vol. 2: Reactor Design; Vol. 3: Reactor Analysis; Vol. 4: Reactors of Generations III and IV; Vol. 5: Fuel Cycles, Decommissioning, Waste Disposal and Safeguards* [online]. Springer, 2010, s. 2842-2894 [cit. 2018-11-25]. DOI: 10.1007/978-0-387-98149\_24. ISBN 978-0-387-98150-5. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/profile/Anton\\_Tonchev/publication/235247161\\_GEM\\_STAR\\_The\\_Alternative\\_Reactor\\_Technology\\_Comprising\\_Graphite\\_Molten\\_Salt\\_and\\_Accelerators/links/0912f5109f126eb421000000/GEM-STAR-The-Alternative-Reactor-Technology-Comprising-Graphite-Molten-Salt-and-Accelerators.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Anton_Tonchev/publication/235247161_GEM_STAR_The_Alternative_Reactor_Technology_Comprising_Graphite_Molten_Salt_and_Accelerators/links/0912f5109f126eb421000000/GEM-STAR-The-Alternative-Reactor-Technology-Comprising-Graphite-Molten-Salt-and-Accelerators.pdf)
- [73] Muons and ADNA proposing using accelerator-driven subcritical reactor for heat for production of synthetic fuels and chemicals. In: *Green Car Congress: Energy, technologies, issues and policies for sustainable mobility* [online]. BioAge Group, 2019, 28 December 2012 [cit. 2019-01-22]. Dostupné z: <https://www.greencarcongress.com/2012/12/adsr-20121218.html>
- [74] GOHAR, Yoursly, David JOHNSON, Todd JOHNSON a Shekhar MISHRA. *Fermilab Project-X Nuclear Energy Application: Accelerator, Spallation Target and Transmutation Technology Demonstration*. 2017, 7 s. Dostupné také z: <https://indico.fnal.gov/event/3579/material/8/1>

- [75] TAKIZUKA, Takakazu. JAERI Accelerator Driven System Project. In: *Accelerator Driven Systems: Energy Generation and Transmutation of Nuclear Waste: Status Report* [online]. Vienna: IAEA, 1997, s. 87-105 [cit. 2018-11-25]. ISSN 1011-4289. Dostupné z: <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/29/022/29022018.pdf>
- [76] CHAI, Jong-Seo. A Status and Prospect of Thorium-Based ADS in Korea. In: *Thorium Energy for the World* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2016, 2016-04-05, s. 305-310 [cit. 2018-12-01]. DOI: 10.1007/978-3-319-26542-1\_45. ISBN 978-3-319-26540-7. Dostupné z: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-26542-1\\_45](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-26542-1_45)
- [77] MISHIMA, Kaichiro, Hironobu UNESAKI, Tsuyoshi MISAWA, et al. Research Project on Accelerator-driven Subcritical System Using FFAG Accelerator and Kyoto University Critical Assembly. *Journal of Nuclear Science and Technology* [online]. 2007, **44**(3), 499-503 [cit. 2018-12-01]. DOI: 10.1080/18811248.2007.9711314. ISSN 0022-3131. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/18811248.2007.9711314>
- [78] SHI, Yongqian, Pu XIA, Zhanglin LUO, et al. China ADS sub-critical experimental assembly—Venus-1 and preliminary experiment. *Frontiers of Energy and Power Engineering in China* [online]. 2007, **1**(2), 150-157 [cit. 2018-11-26]. DOI: 10.1007/s11708-007-0019-5. ISSN 1673-7393. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/225720492\\_China\\_ADS\\_sub-critical\\_experimental\\_assembly-Venus-1\\_and\\_preliminary\\_experiment](https://www.researchgate.net/publication/225720492_China_ADS_sub-critical_experimental_assembly-Venus-1_and_preliminary_experiment)
- [79] JIE, Wei, Fu SHI-NIAN, Tang JING-YU, Tao JU-ZHOU, Wang DING-SHENG, Wang FANG-WEI a Wang SHENG. China Spallation Neutron Source - an overview of application prospects. *Chinese Physics C* [online]. 2009, **33**(11), 1033-1042 [cit. 2018-12-01]. DOI: 10.1088/1674-1137/33/11/021. ISSN 1674-1137. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1674-1137/33/i=11/a=021?key=crossref.fdae8bb91c9b24ad805d7476356b8711>
- [80] CiADS@IMP: Introduction to ADANES Research in China. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences* [online]. China: IMP, 20-06-2017 [cit. 2019-01-03]. Dostupné z: [http://english.imp.cas.cn/Work2017/CI2017/201706/t20170620\\_178401.html](http://english.imp.cas.cn/Work2017/CI2017/201706/t20170620_178401.html)
- [81] YAN, Xuesong, Lei YANG, Xunchao ZHANG a Wenlong ZHAN. Concept of an Accelerator-Driven Advanced Nuclear Energy System. *Energies* [online]. 2017, **10**(7), 1-13 [cit. 2018-11-26]. DOI: 10.3390/en10070944. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1073/10/7/944/pdf>
- [82] MAEKAWA, Fujio. J-PARC Transmutation Experimental Facility Program. *Plasma and Fusion Research* [online]. 2018, **13**, 2505045-2505045 [cit. 2018-11-26]. DOI: 10.1585/pfr.13.2505045. ISSN 1880-6821. Dostupné z: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/pfr/13/0/13\\_2505045/\\_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/pfr/13/0/13_2505045/_article)
- [83] Transmutation Experimental Facility (TEF). In: *J-PARC* [online]. 2011 [cit. 2019-01-22]. Dostupné z: <https://j-parc.jp/Transmutation/en/index.html>
- [84] SINHA, Amar, Tushar ROY a Rajeev KUMAR. Overview of Activities on Accelerator Driven Subcritical System in India. In: *ANS Conference: 13th International Topical Meeting on Nuclear Applications of Accelerators* [online]. USA: Greyden, 2017, s. 243-251 [cit. 2018-12-01]. Dostupné z: <http://accapp17.org/wp-content/2017/data/pdfs/134-22919.pdf>
- [85] *Proceedings of XXII International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems — PoS(Baldin ISHEPP XXII)* [online]. Trieste, Italy: Sissa Medialab, 2015 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://pos.sissa.it/225/065>

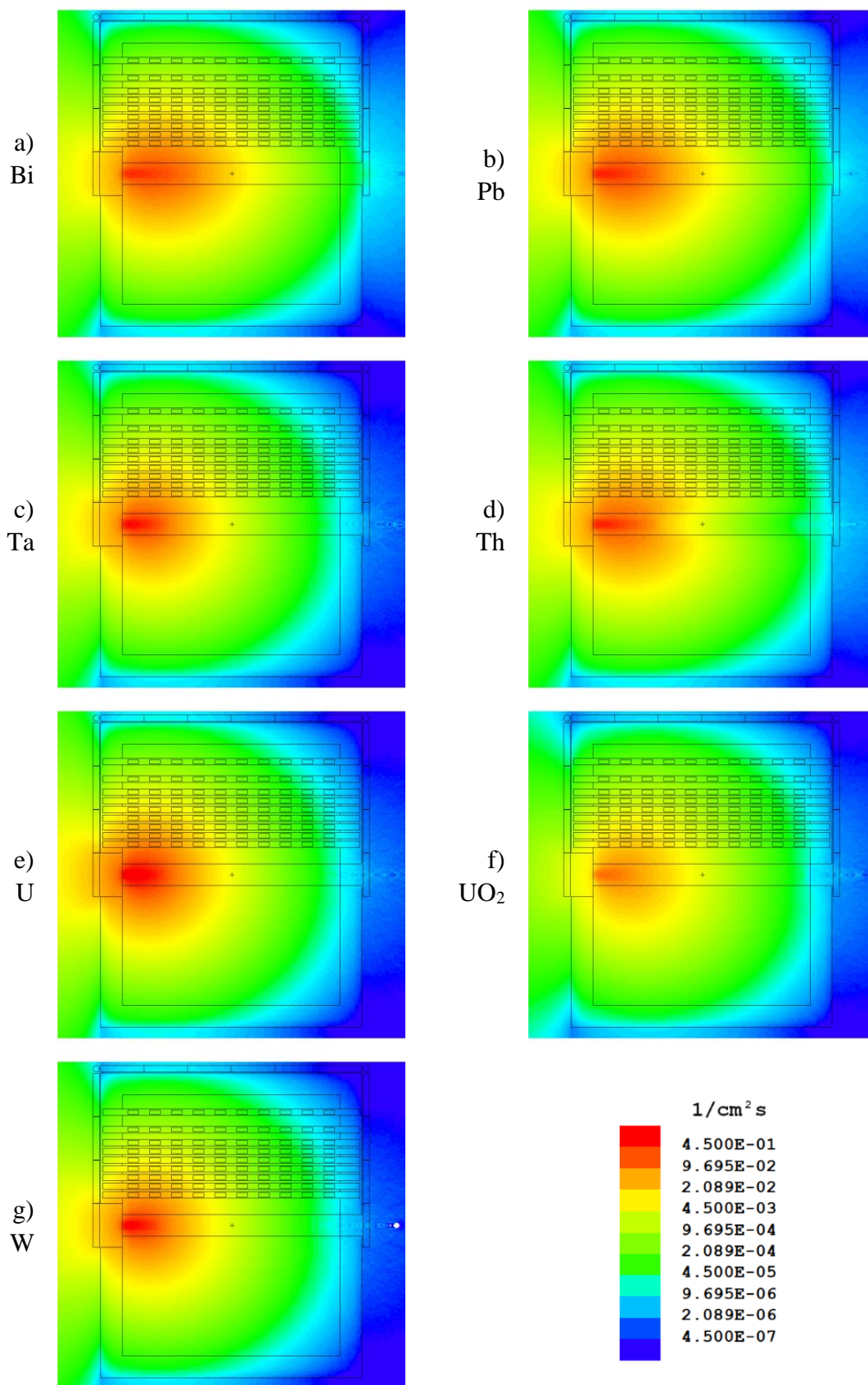
- [86] GRAY, Theodore. 209 Bi. *Periodictable.com* [online]. 2017 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://periodictable.com/Isotopes/083.209/index3.html>
- [87] Q-value Calculator (QCalc). *National Nuclear Data Center* [online]. USA: Brookhaven National Laboratory, 2018 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.nndc.bnl.gov/qcalc/>
- [88] SVOBODA, Josef, Karel KATOVSKY, Miroslav ZEMAN, et al. Determination of the neutron flux by the temperature differences at the massive spallation uranium target QUINTA. *2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)* [online]. IEEE, 2016, 2016, , 1-4 [cit. 2019-05-13]. DOI: 10.1109/EPE.2016.7521796. ISBN 978-1-5090-0908-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7521796/>
- [89] BRIESMEISTER, Judith F., ed. *MCNP—A General Monte Carlo N-Particle Transport Code*. Los Alamos National Laboratory, 2000, 790 s. Dostupné také z: <https://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-13709-M>
- [90] WERNER, J. C., ed. *MCNP Users Manual - Code Version 6.2*. Los Alamos National Security, 2017. LA-UR-17-29981.
- [91] Table of Nuclides. In: *Nuclear Data Center at KAERI* [online]. Korea: Korea Atomic Energy Research Institute, 2018 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://atom.kaeri.re.kr/nuchart/#>
- [92] MCCONN, Ronald J et al.,. *Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling* [online]. USA: Pacific Northwest National Laboratory, 2011 [cit. 2019-05-17]. DOI: 10.2172/1023125. Dostupné z: [https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical\\_reports/PNNL-15870Rev1.pdf](https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-15870Rev1.pdf)
- [93] Uranium Diboride. *American Elements: The Advanced Materials Manufacturer* [online]. USA: American Elements, 2019 [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: <https://www.americanelements.com/uranium-diboride-12007-36-2>



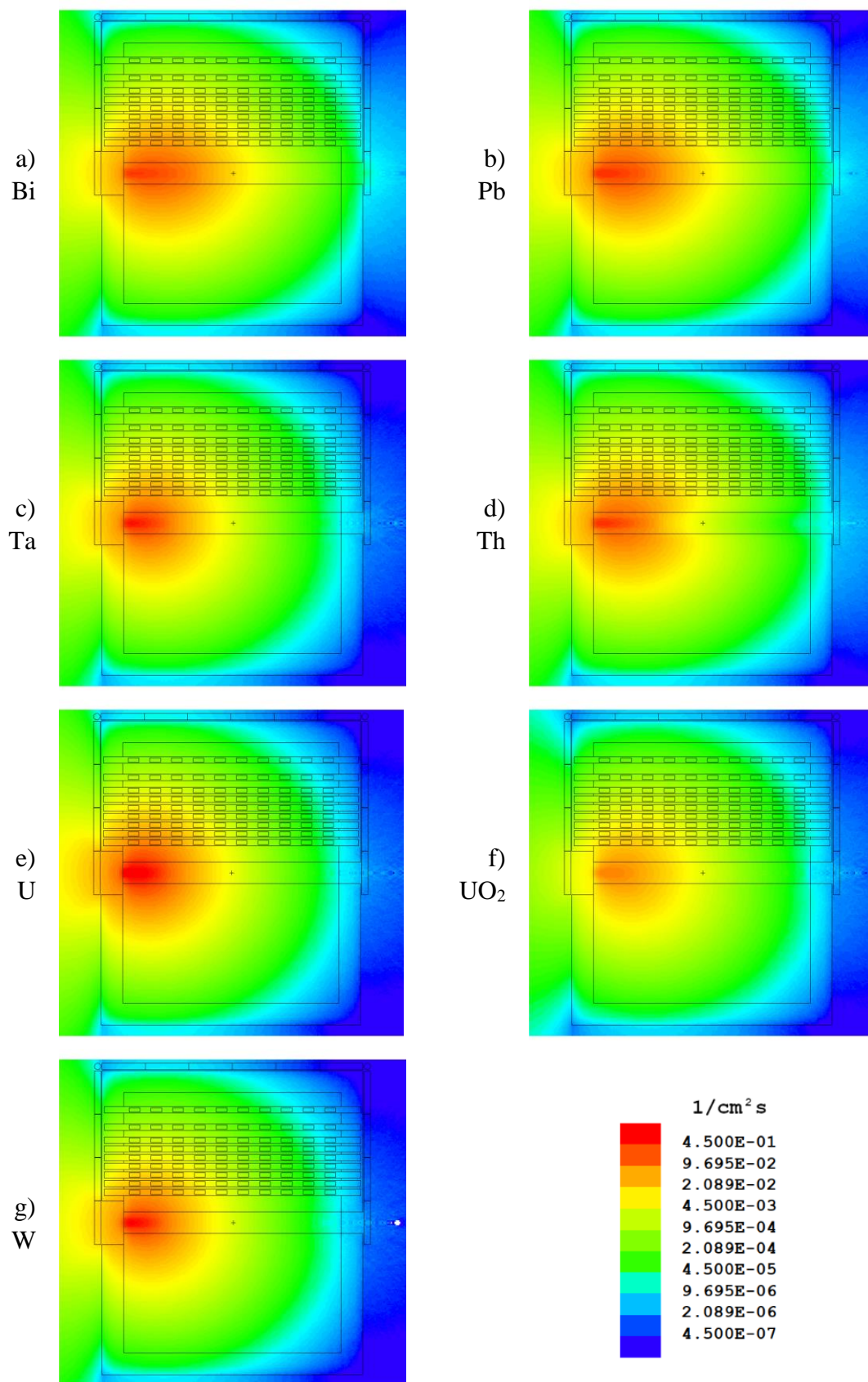
**SEZNAM PŘÍLOH**

<b>PŘÍLOHA A – TĚŽKÉ TERČE.....</b>	<b>62</b>
<b>PŘÍLOHA B – LEHKÉ TERČE.....</b>	<b>69</b>
<b>PŘÍLOHA C – KOMBINOVANÉ TERČE B/U.....</b>	<b>76</b>
<b>PŘÍLOHA D – KOMBINOVANÉ TERČE U/B.....</b>	<b>83</b>
<b>PŘÍLOHA E – KOMBINOVANÝ TERČ B/U 5/1 .....</b>	<b>90</b>
<b>PŘÍLOHA F – HOMOGENNÍ TERČ.....</b>	<b>91</b>
<b>PŘÍLOHA G – POROVNÁNÍ.....</b>	<b>92</b>

## Příloha A – Těžké terče

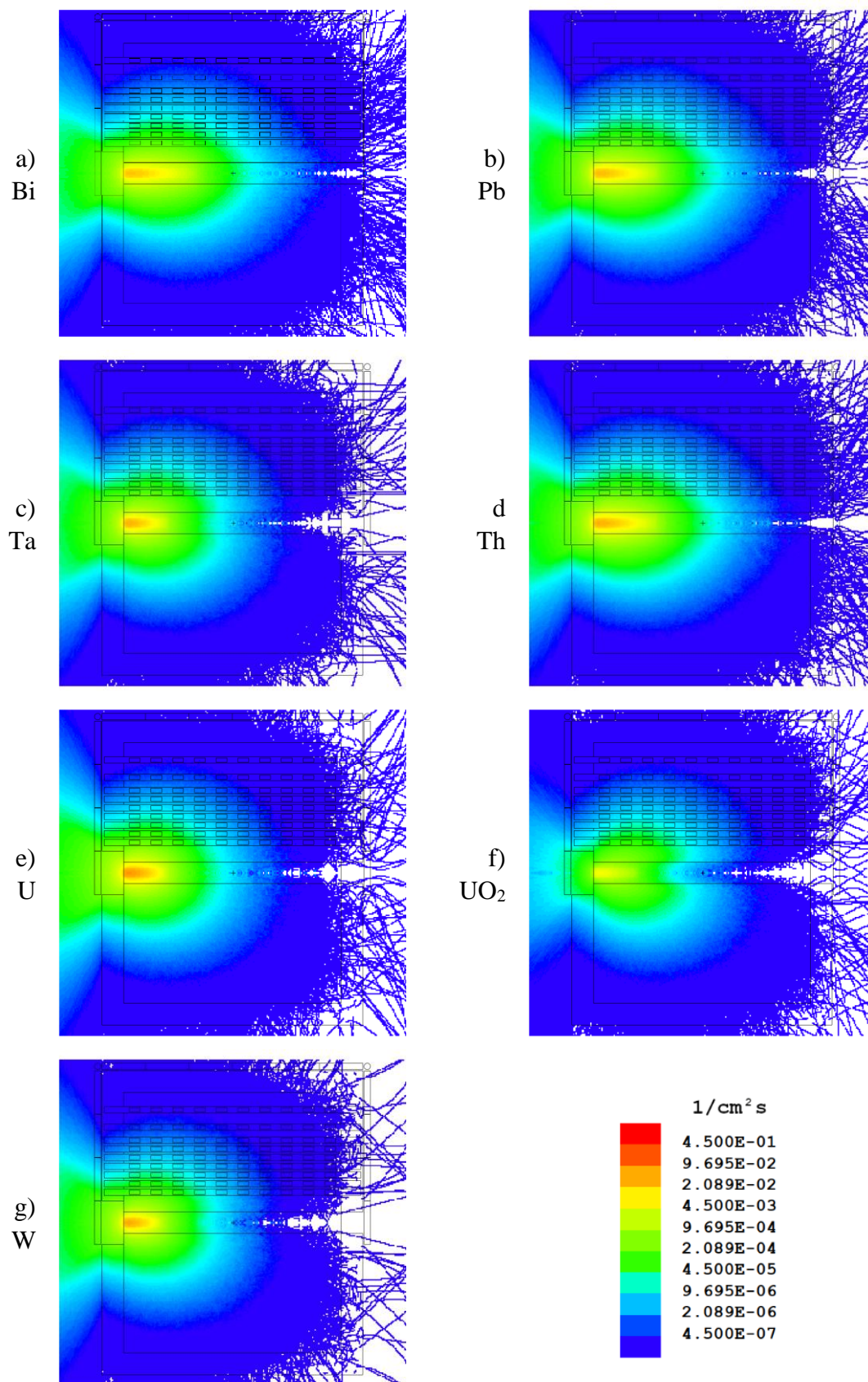


Obr. 24 a) – g) Hustota neutronového toku v celém neutronovém spektru při použití různých těžkých terčů.

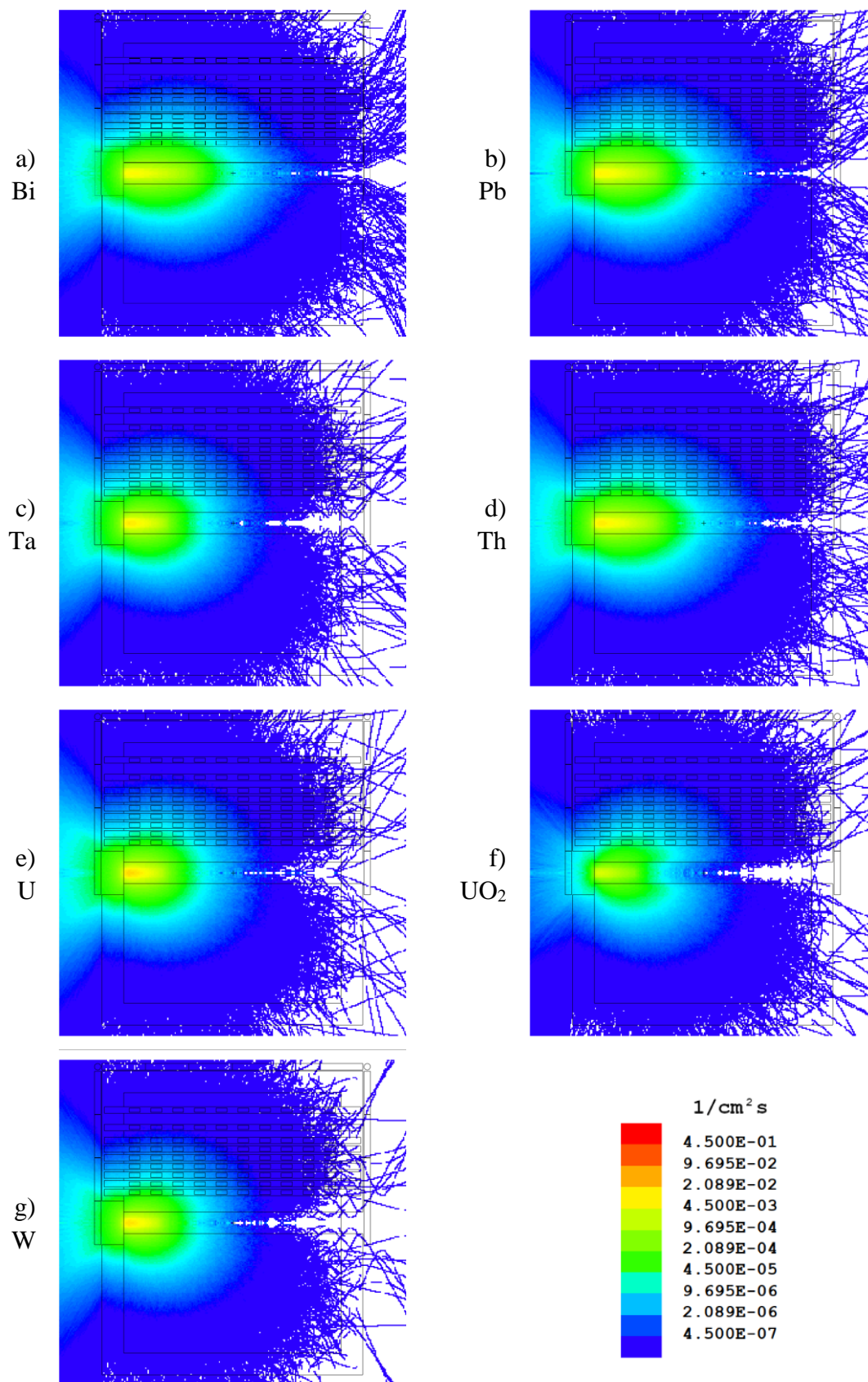


Obr. 25 a) – g) Hustota neutronového toku pro energie 0-7 MeV při použití různých těžkých terčů.

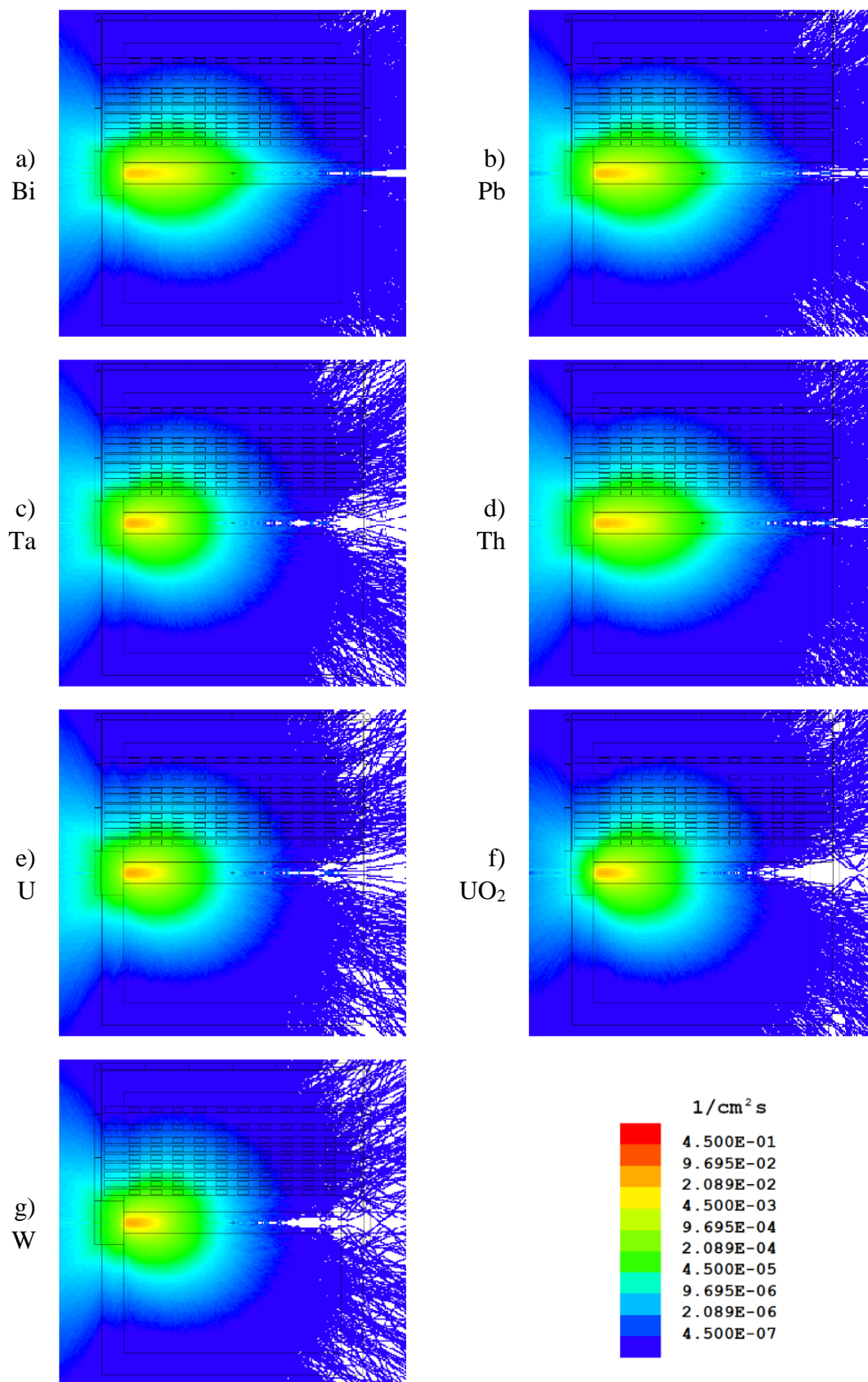




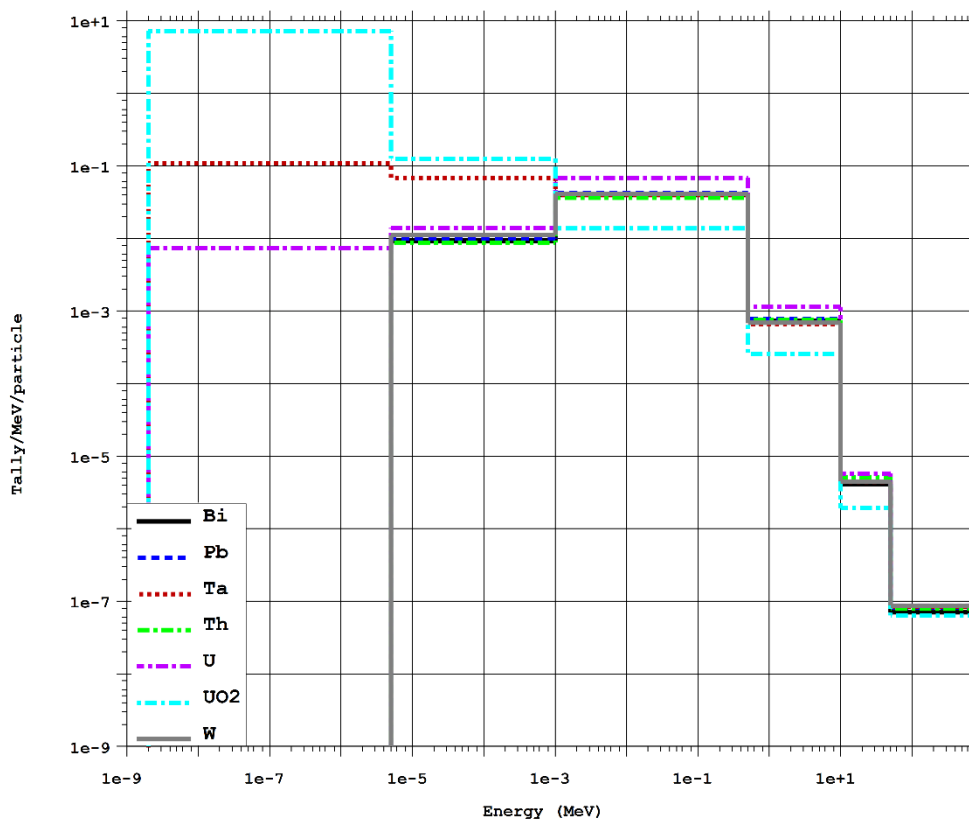
Obr. 26 a) – g) Hustota neutronového toku pro energie 7-15 MeV při použití různých těžkých terčů.



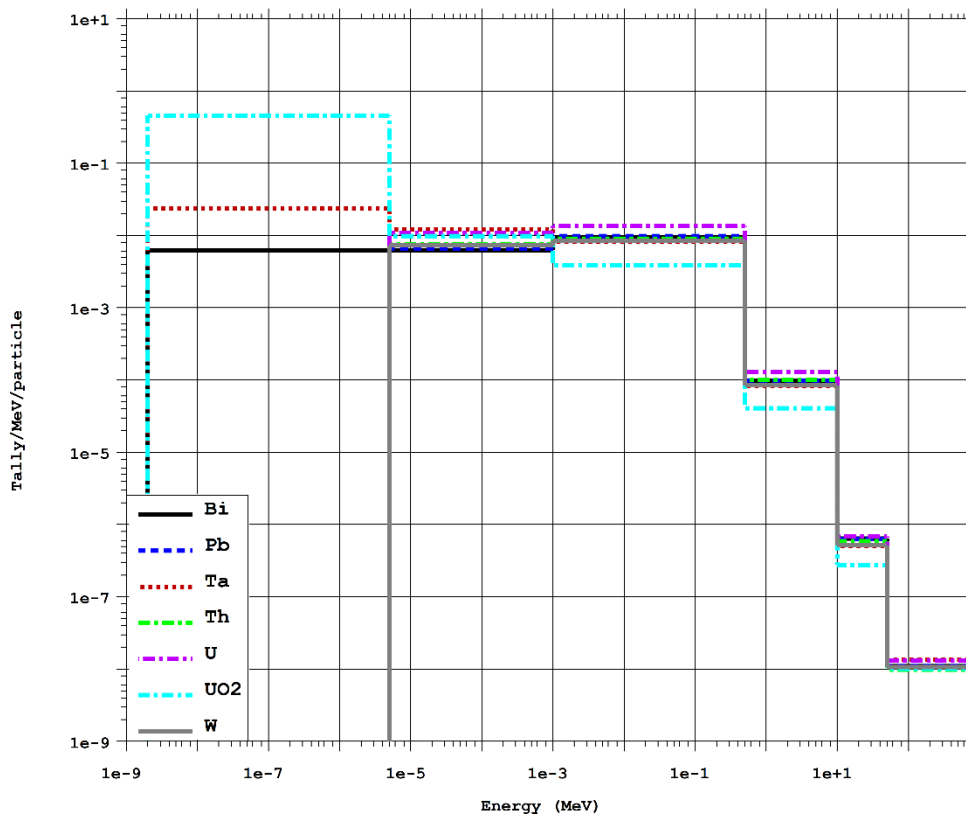
Obr. 27 a) – g) Hustota neutronového toku pro energie 15-25 MeV při použití různých těžkých terčů.



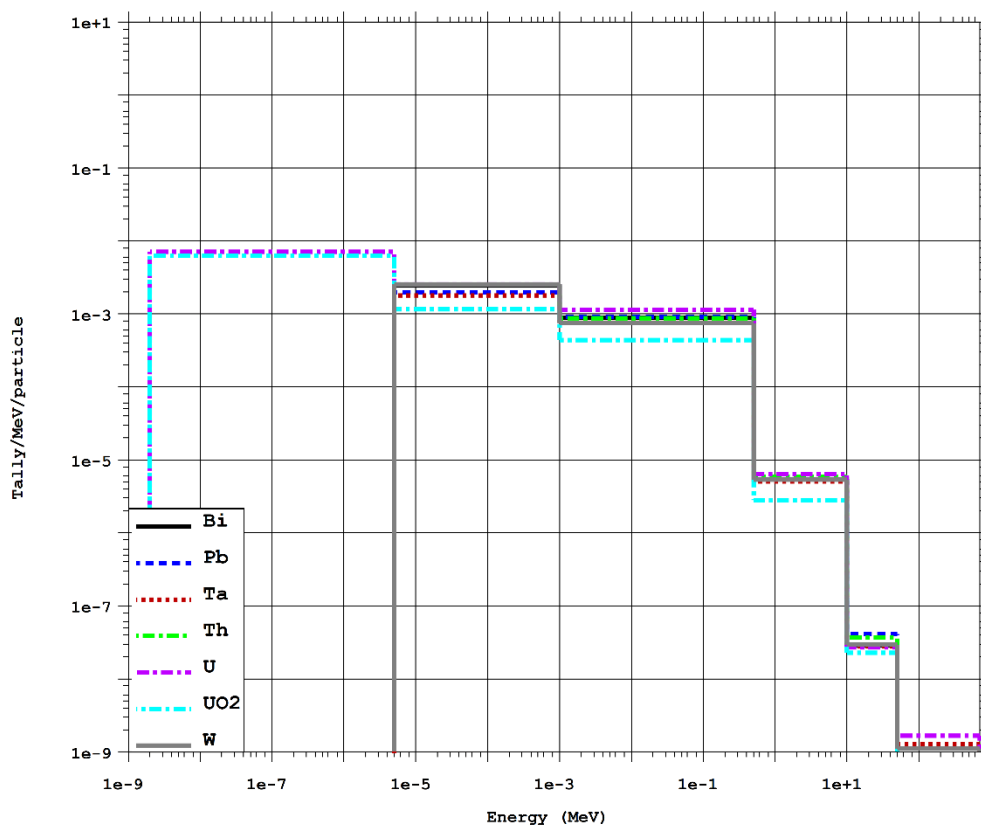
Obr. 28 a) – q) Hustota neutronového toku pro energie 25-700 MeV při použití různých těžkých terčů.



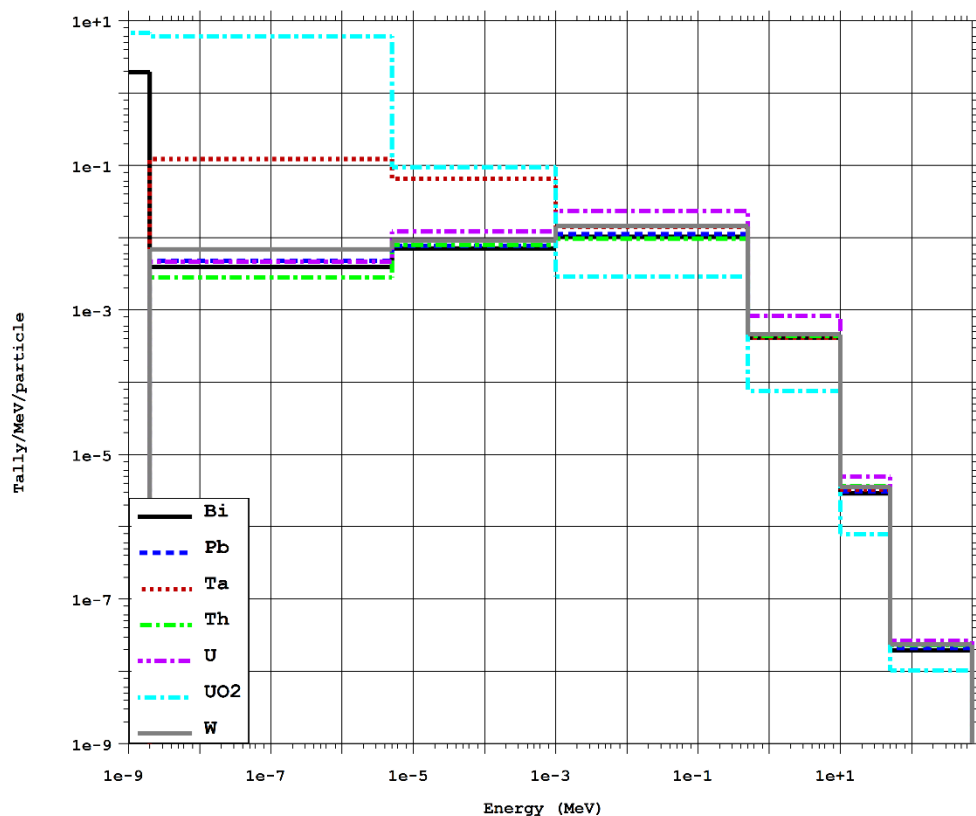
Obr. 29 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 14 cm od osy zařízení pro jednotlivé materiály těžkých terčů.



Obr. 30 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 30 cm od osy zařízení pro jednotlivé materiály těžkých terčů.



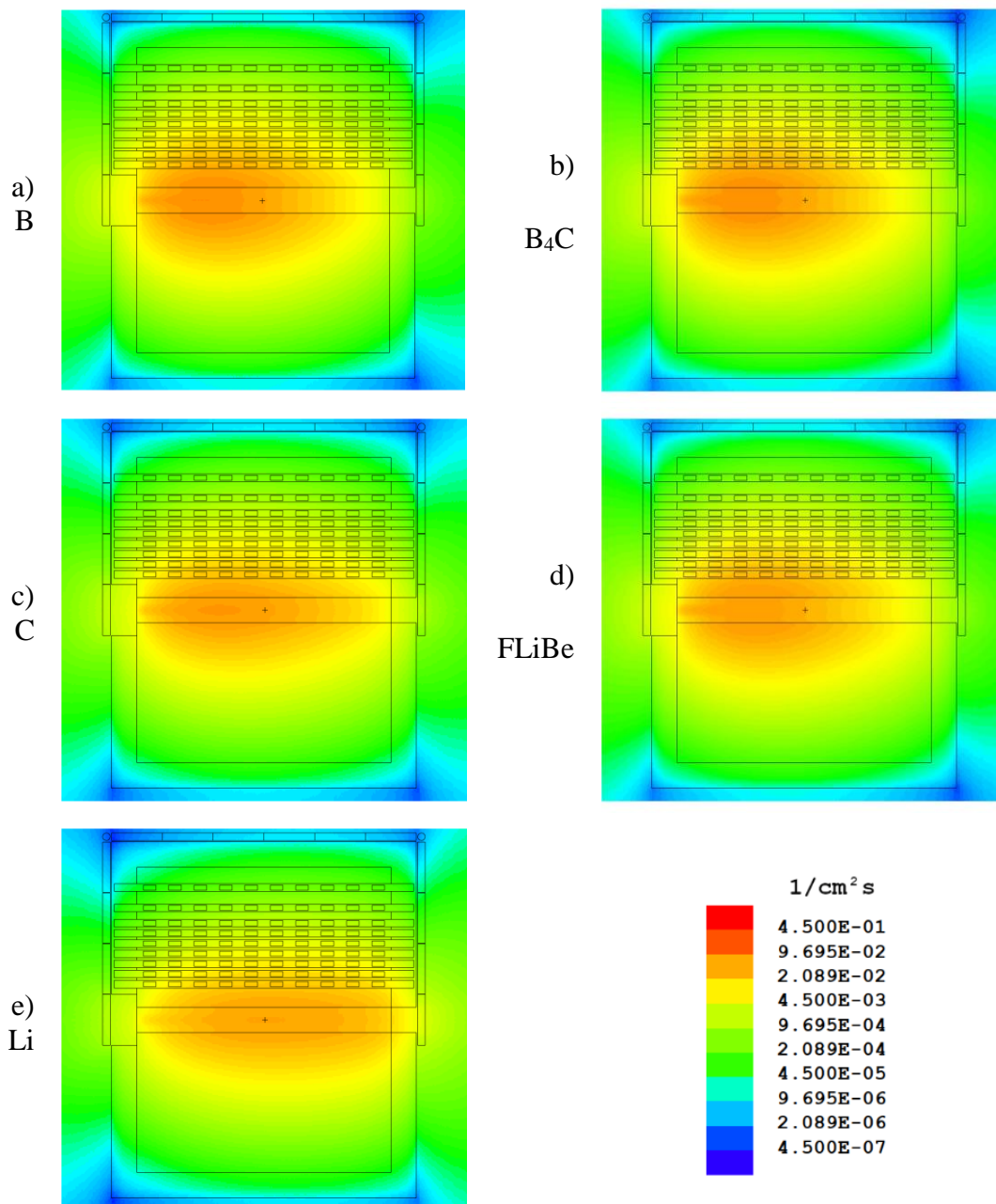
Obr. 31 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 52 cm od osy zařízení pro jednotlivé materiály těžkých terčů.



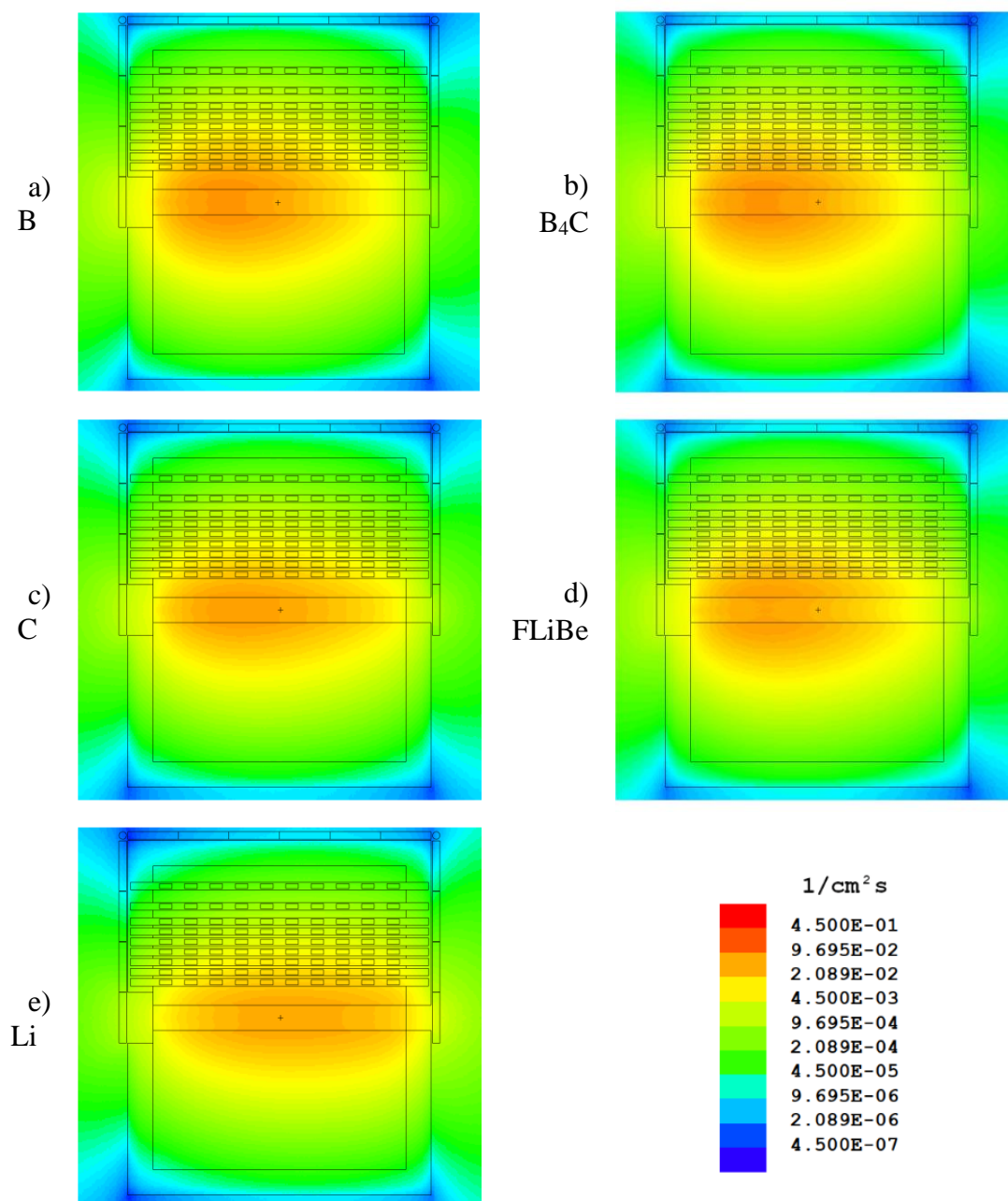
Obr. 32 Střední hustota neutronového toku na obvodu zařízení pro jednotlivé materiály těžkých terčů.



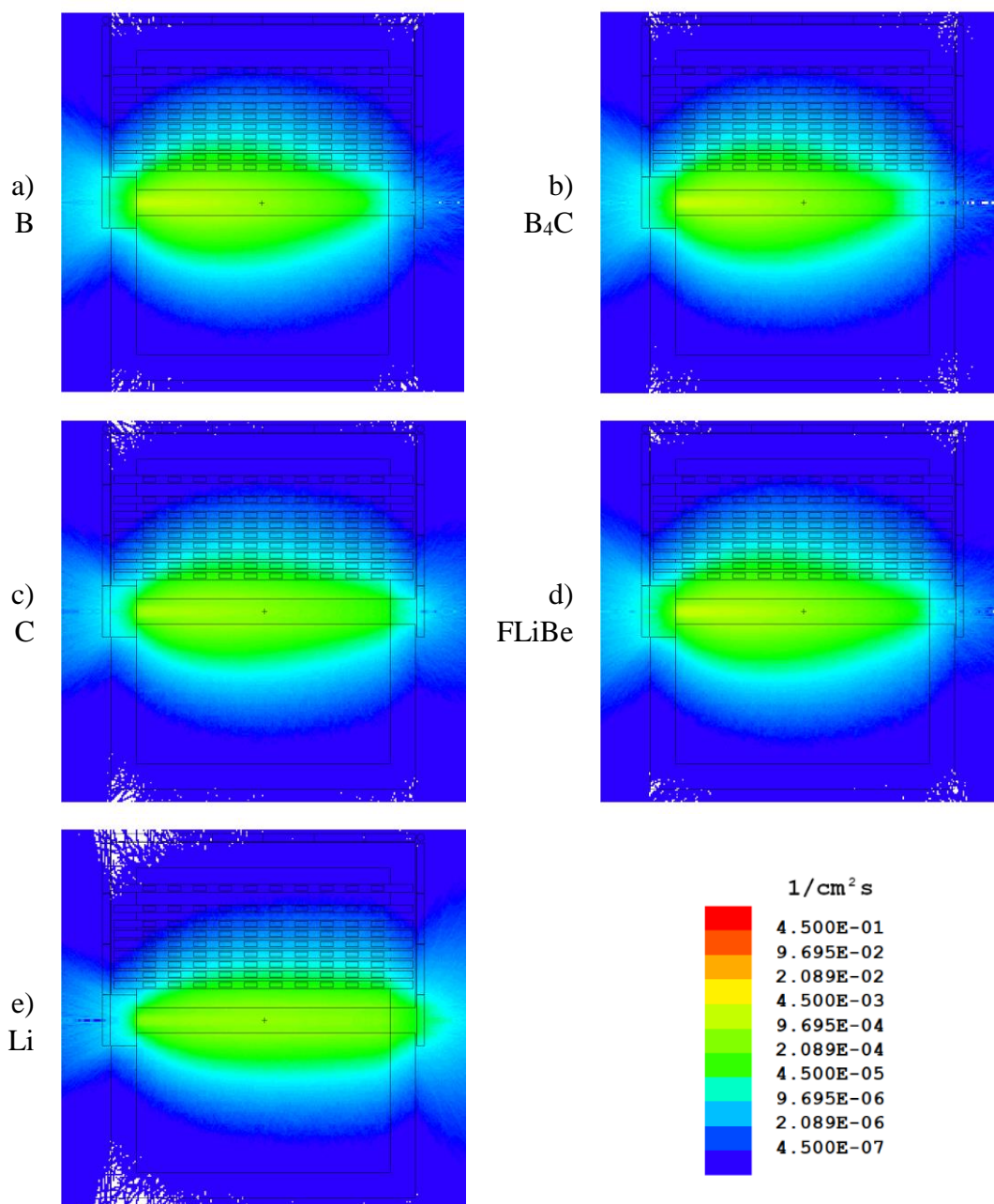
## Příloha B – Lehké terče



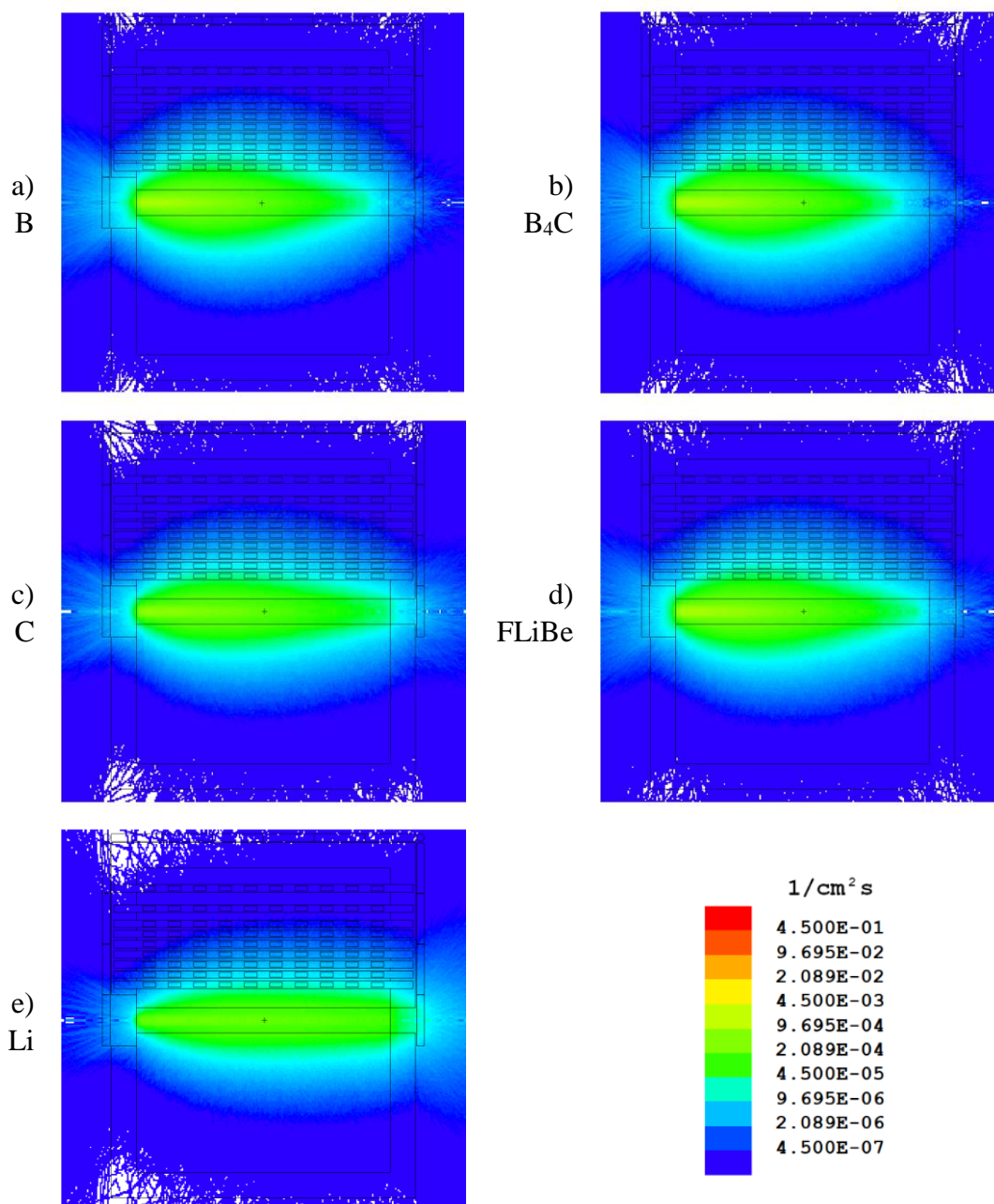
Obr. 33 a) – e) Hustota neutronového toku v celém neutronovém spektru při použití různých lehkých terčů.



Obr. 34 a) – e) Hustota neutronového toku pro energie 0-7 MeV spektru při použití různých lehkých terčů.

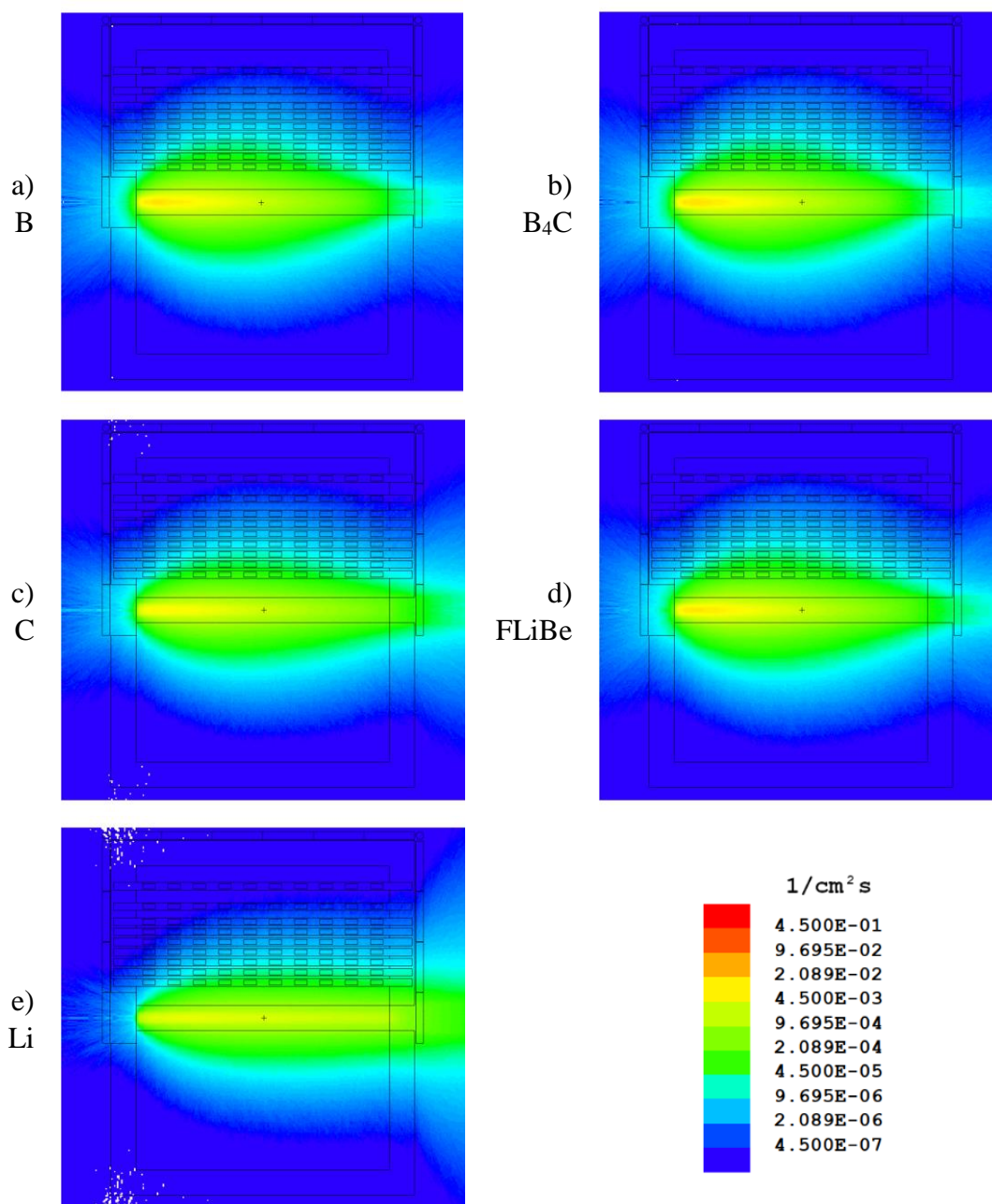


Obr. 35 a) – e) Hustota neutronového toku pro energie 7-15 MeV spektru při použití různých lehkých terčů.

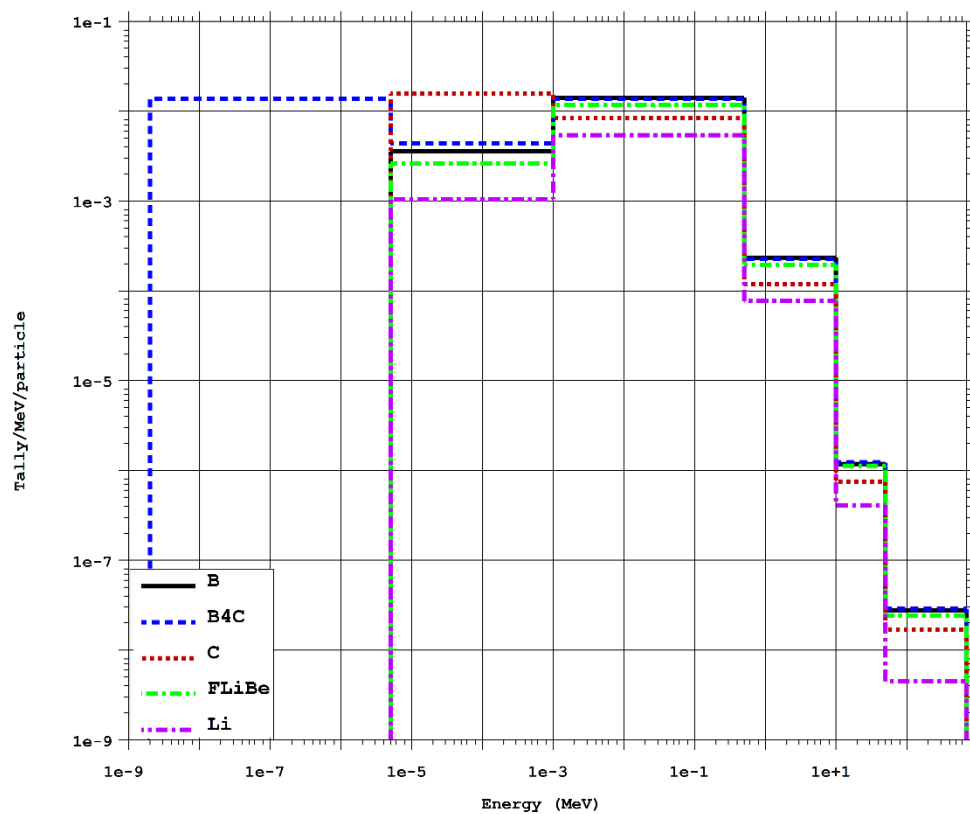


Obr. 36 a) – e) Hustota neutronového toku pro energie 15-25 MeV spektru při použití různých lehkých terčů,

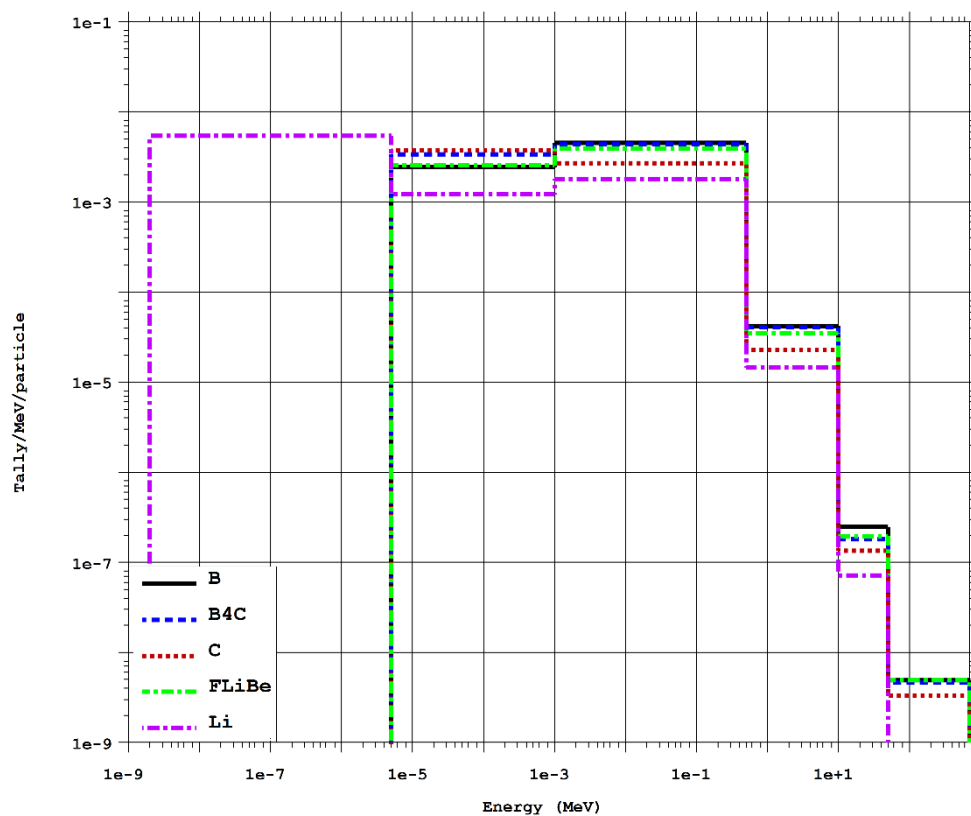




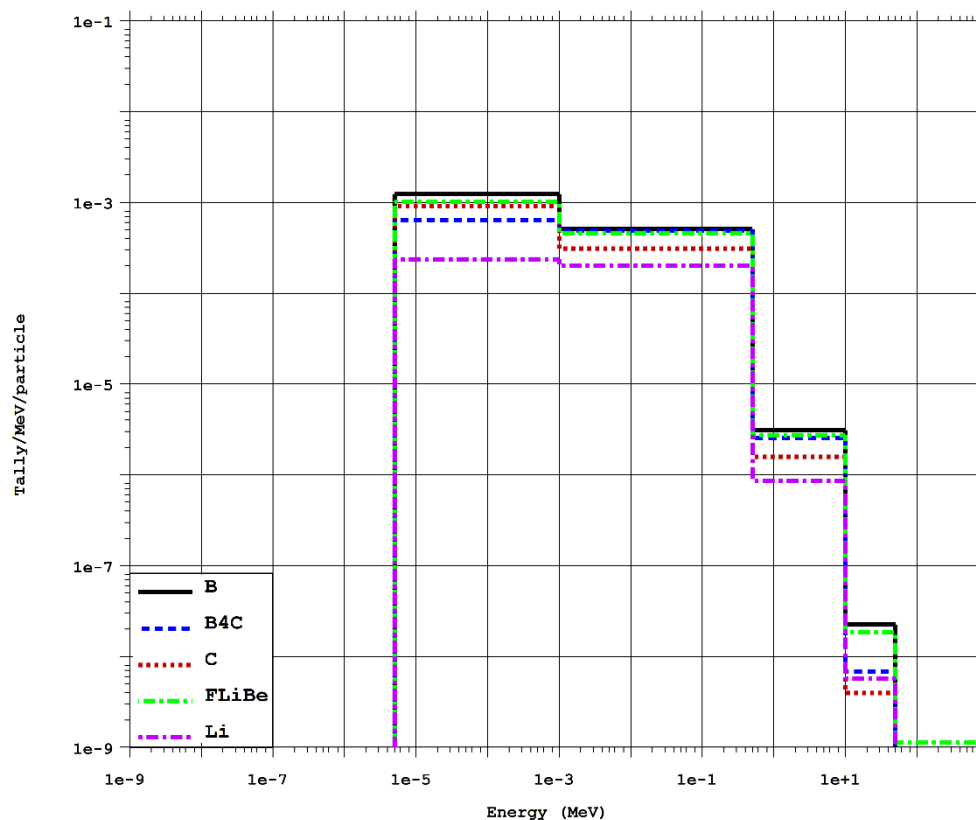
Obr. 37 a) – e) Hustota neutronového toku pro energie 25-700 MeV spektru při použití různých lehkých terčů.



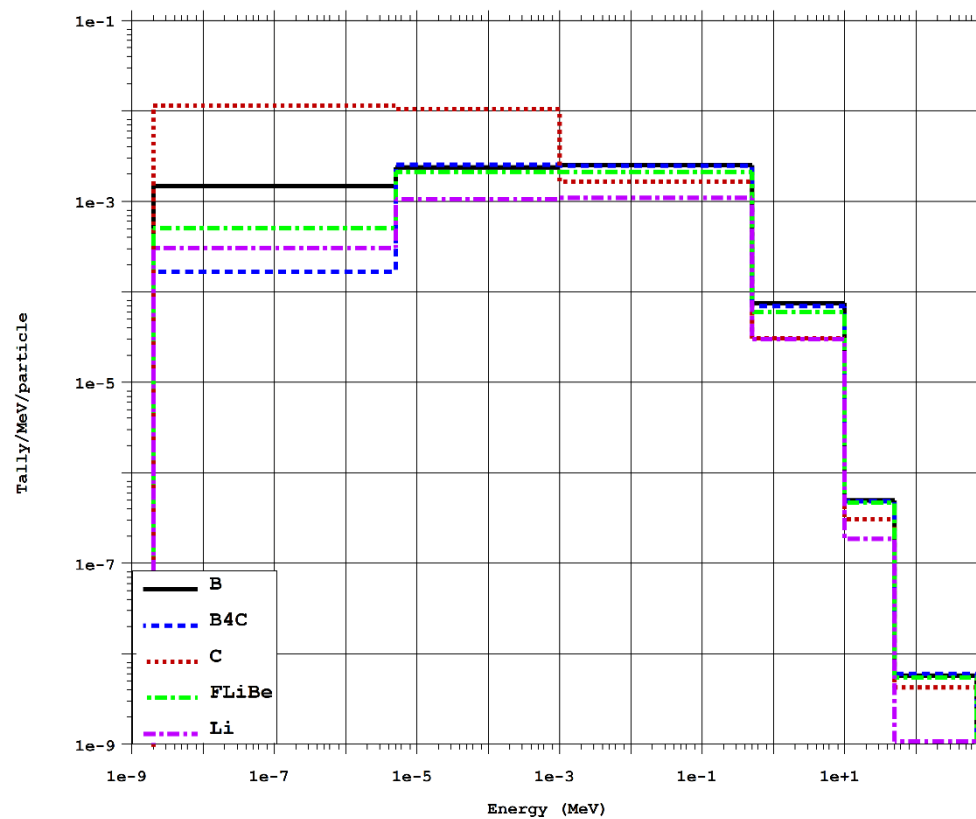
Obr. 38 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 14 cm od osy zařízení pro jednotlivé materiály lehkých terčů.



Obr. 39 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 30 cm od osy zařízení pro jednotlivé materiály lehkých terčů.

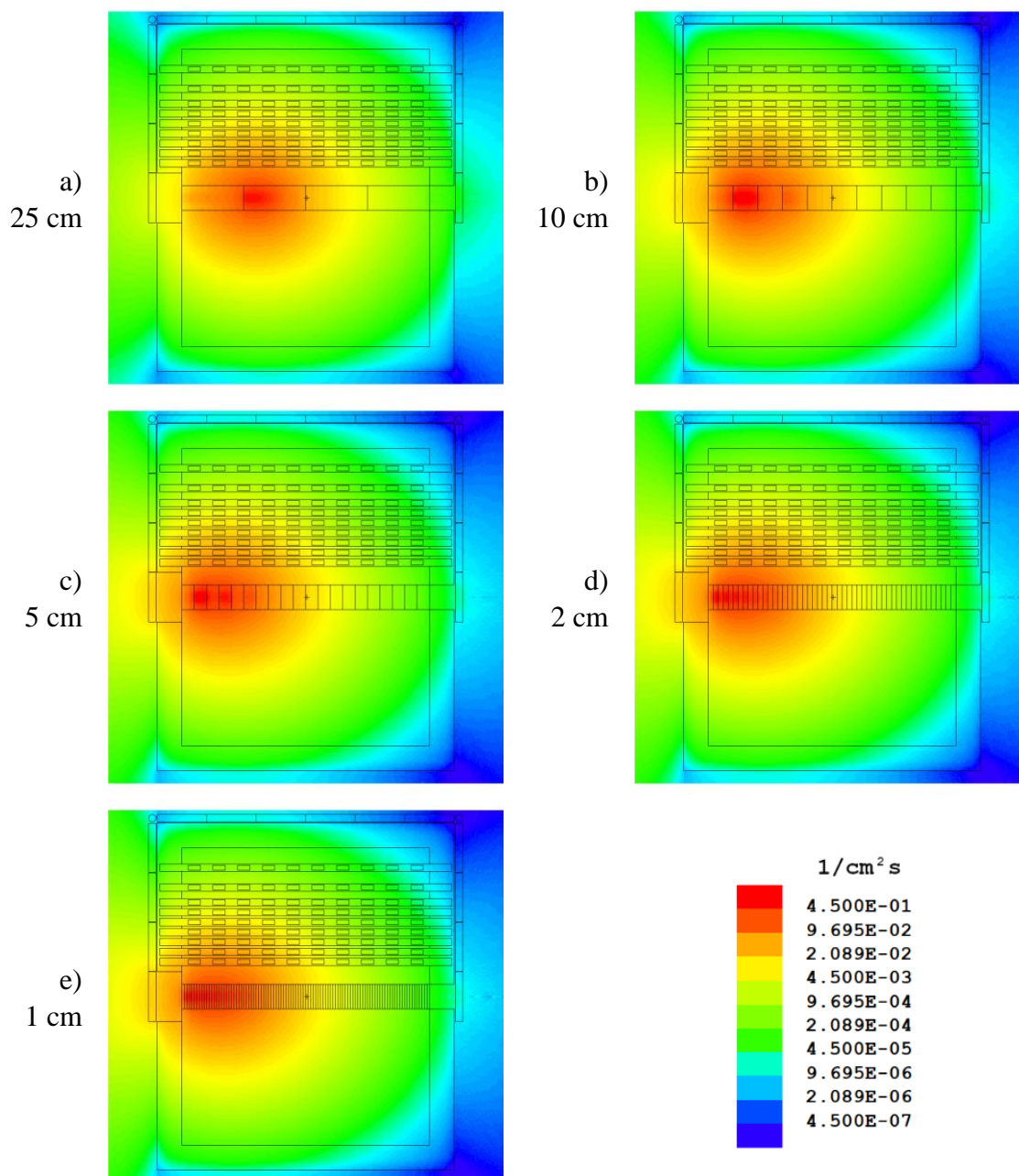


Obr. 40 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 52 cm od osy zařízení pro jednotlivé materiály lehkých terčů.



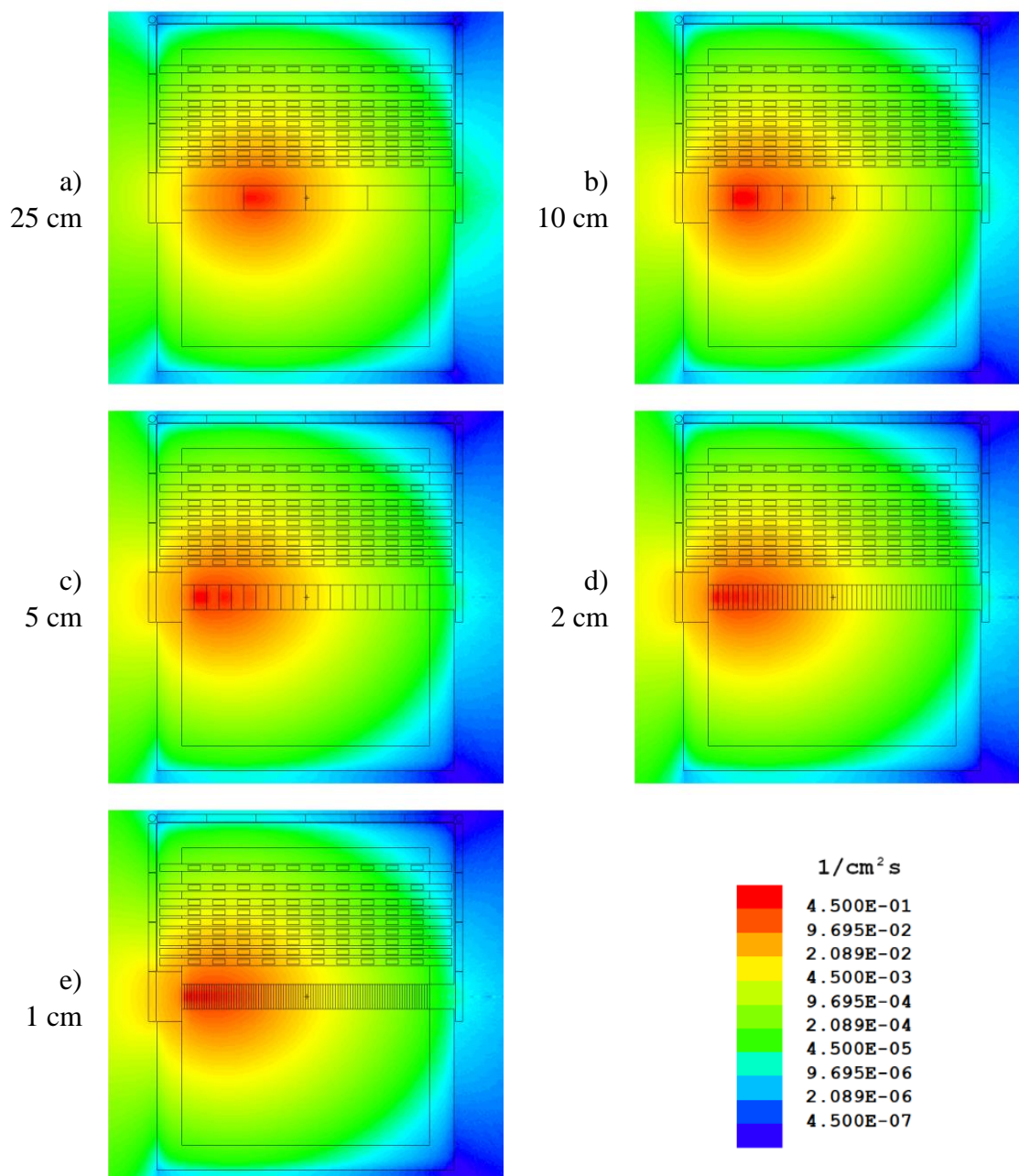
Obr. 41 Střední hustota neutronového toku na obvodu zařízení pro jednotlivé materiály lehkých terčů.

## Příloha C – Kombinované terče B/U

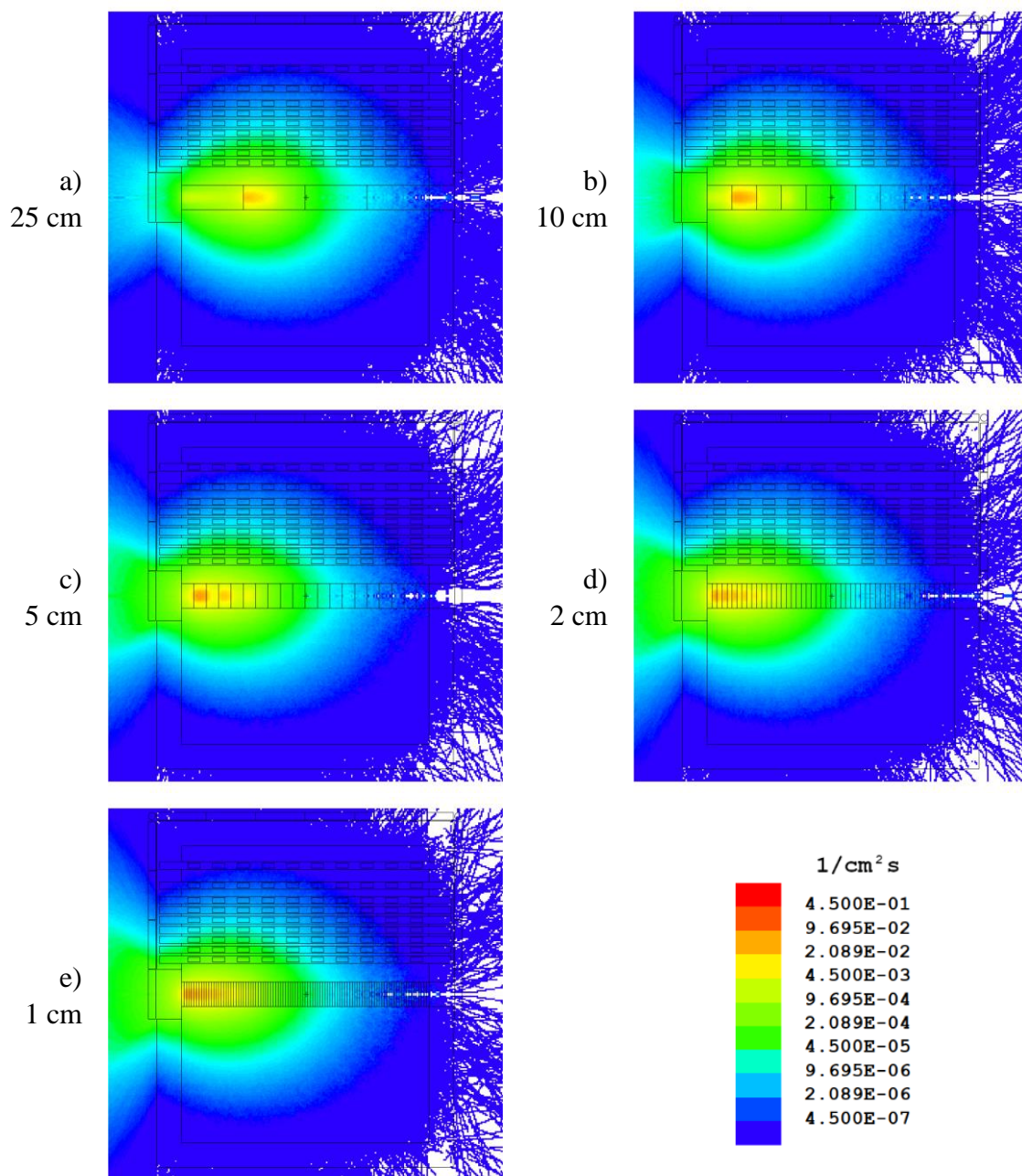


Obr. 42 a) – e) Hustota neutronového toku v celém neutronovém spektru při použití kombinace B/U s různou tloušťkou válců.

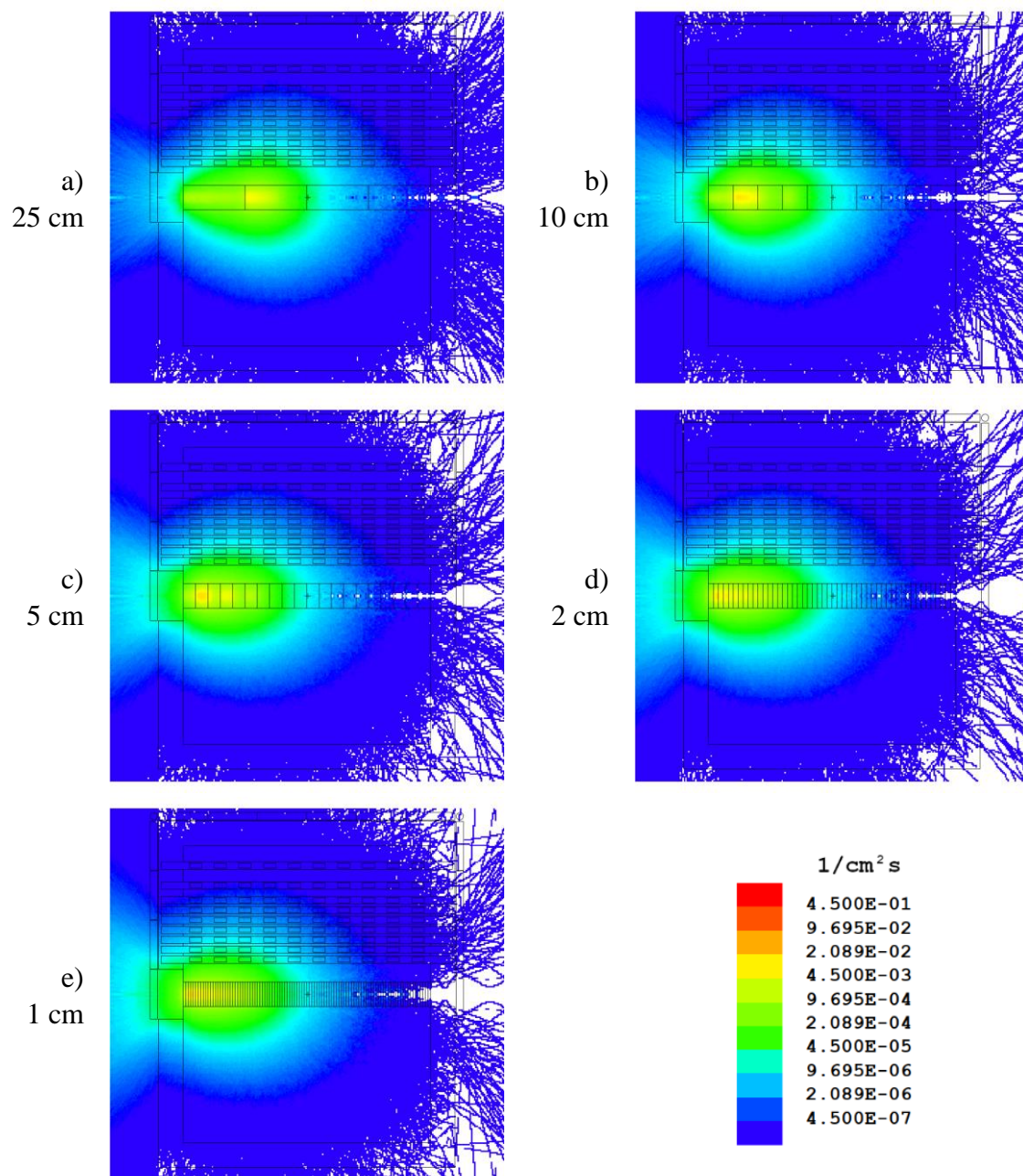




Obr. 43 a) – e) Hustota neutronového toku pro energie 0-7 MeV při použití kombinace B/U s různou tloušťkou válců.

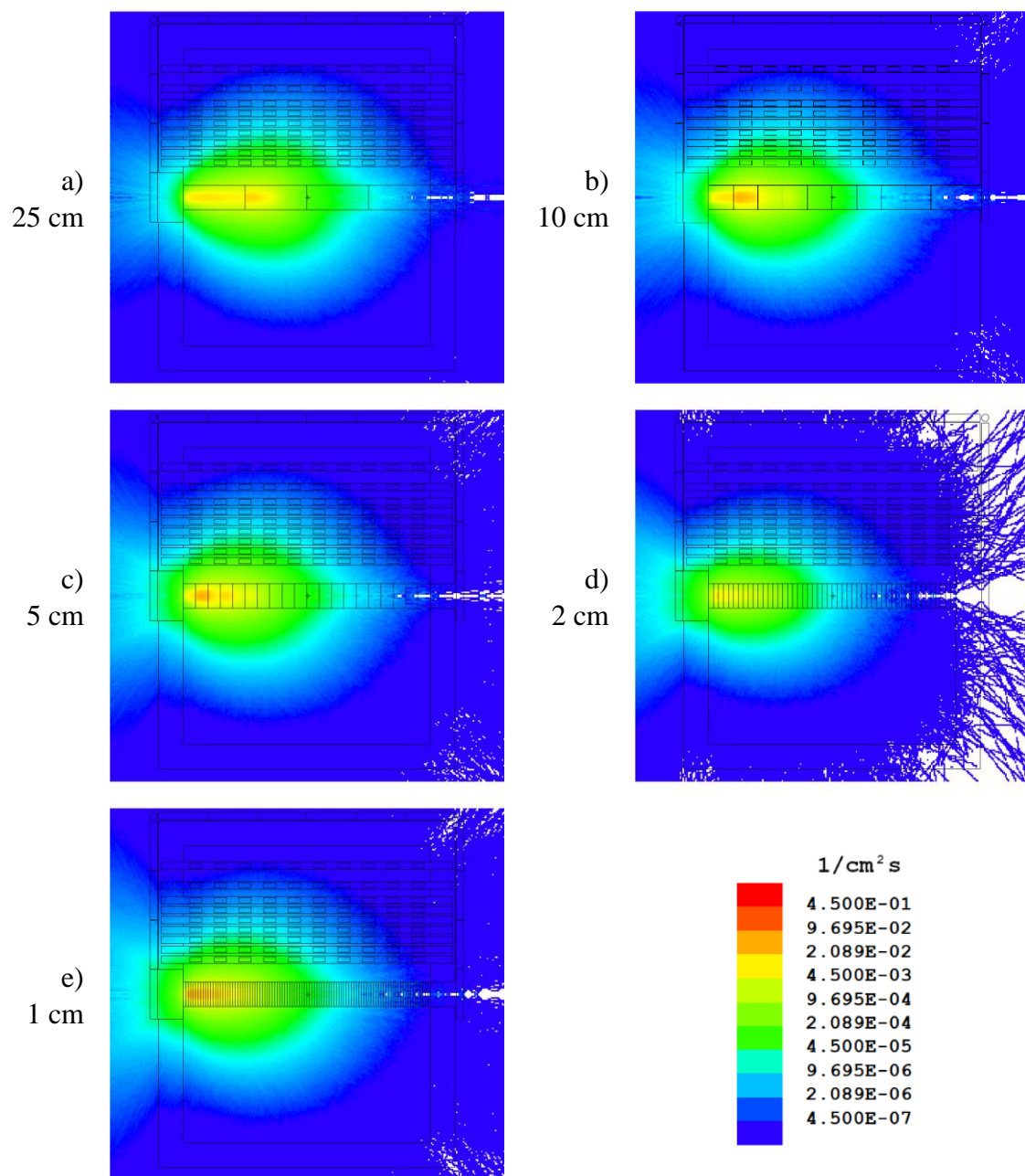


Obr. 44 a) – e) Hustota neutronového toku pro energie 7-15 MeV při použití kombinace B/U s různou tloušťkou válců.

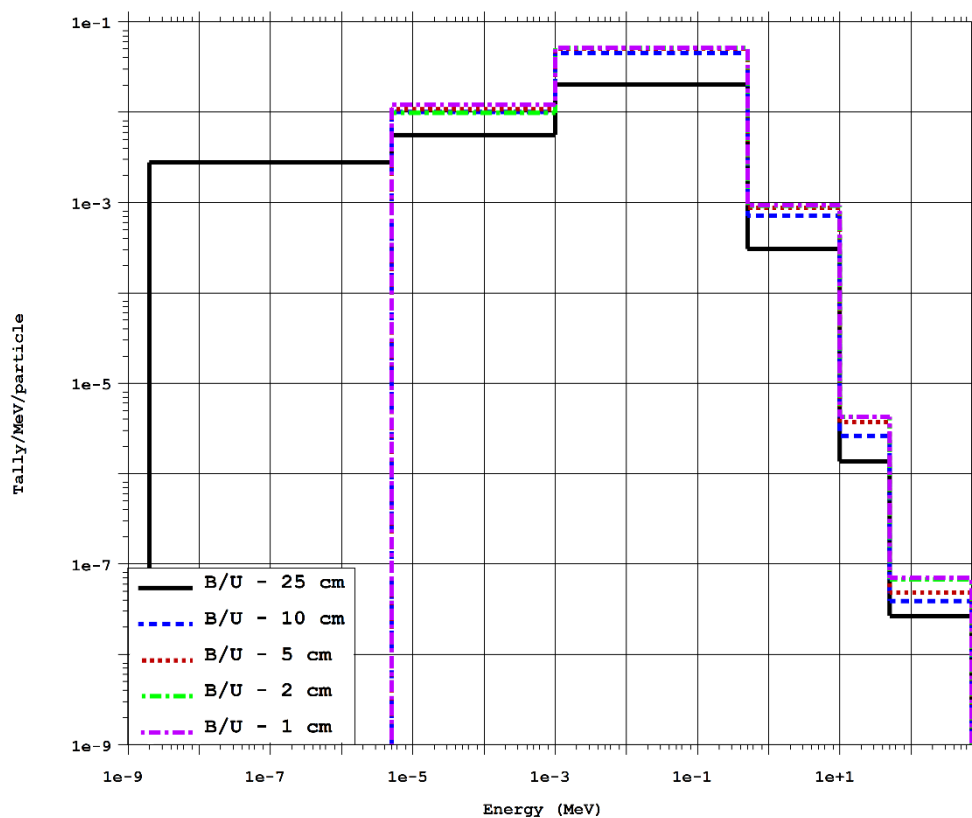


Obr. 45 a) – e) Hustota neutronového toku pro energie 15-25 MeV při použití kombinace B/U s různou tloušťkou válců.

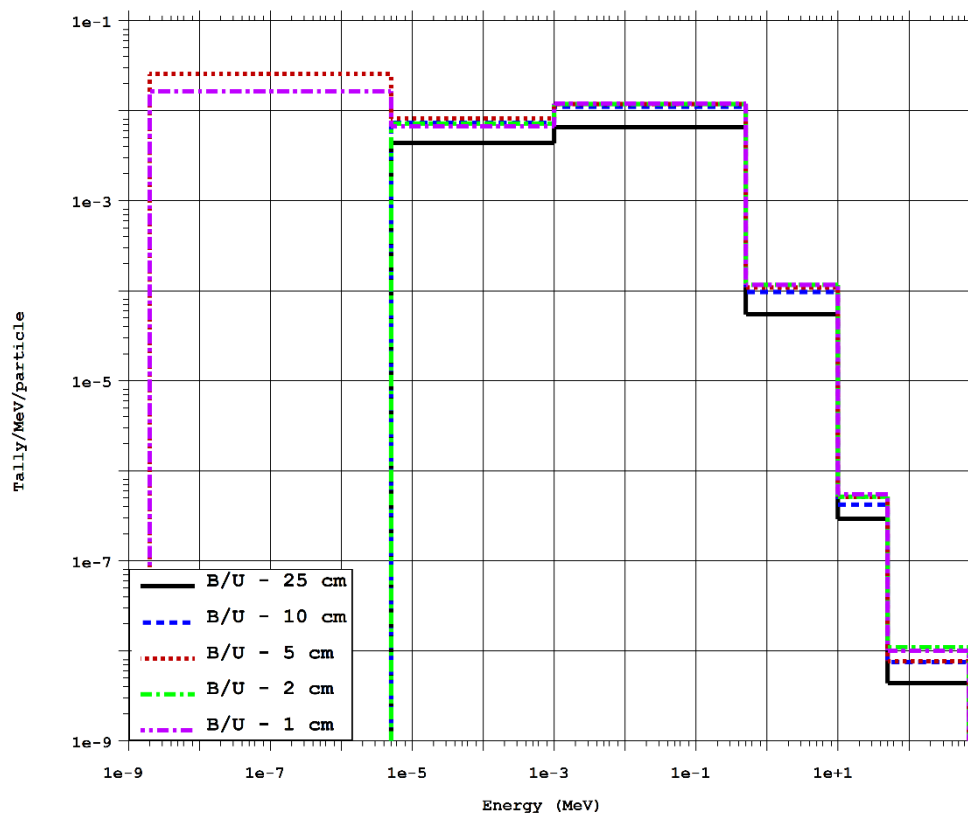




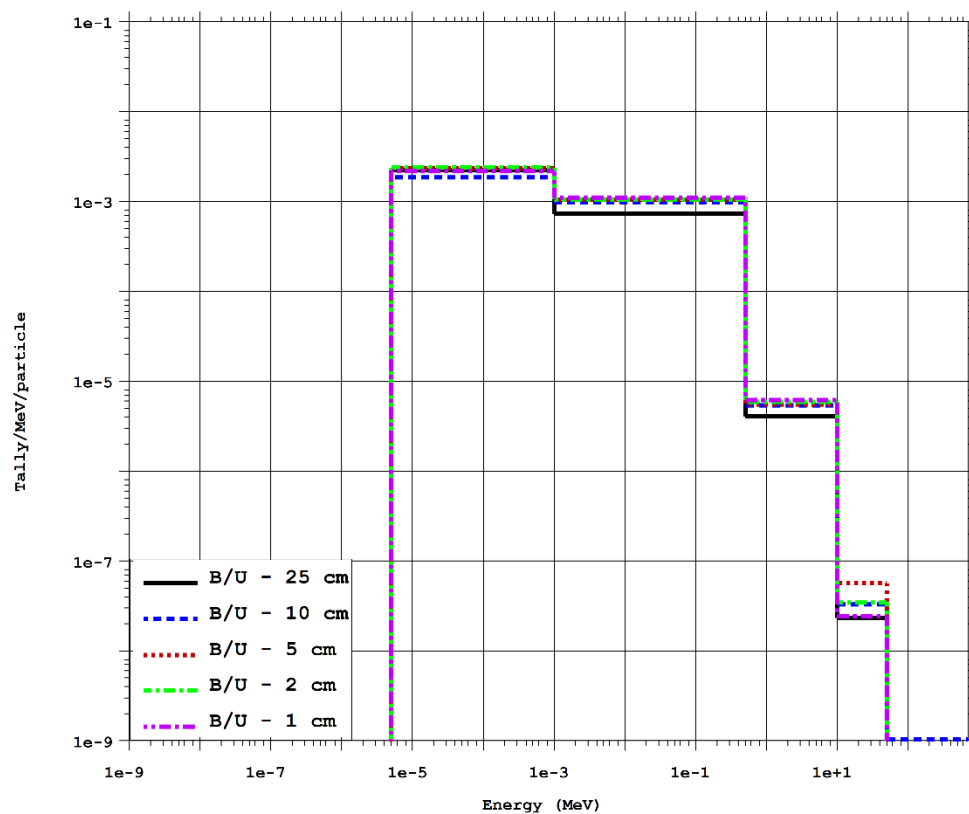
Obr. 46 a) – b) Hustota neutronového toku pro energie 25-700 MeV při použití kombinace B/U s různou tloušťkou válců.



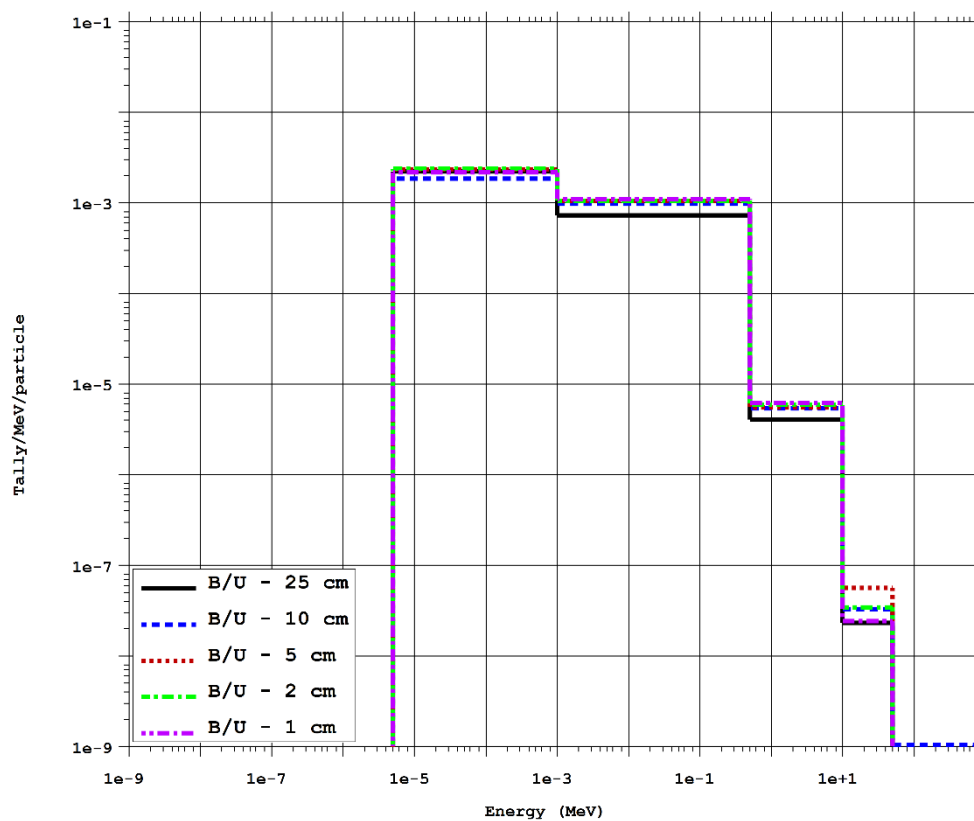
Obr. 47 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 14 cm od osy zařízení pro kombinované B/U terče s různou tloušťkou válců.



Obr. 48 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 30 od osy zařízení pro kombinované B/U terče s různou tloušťkou válců.

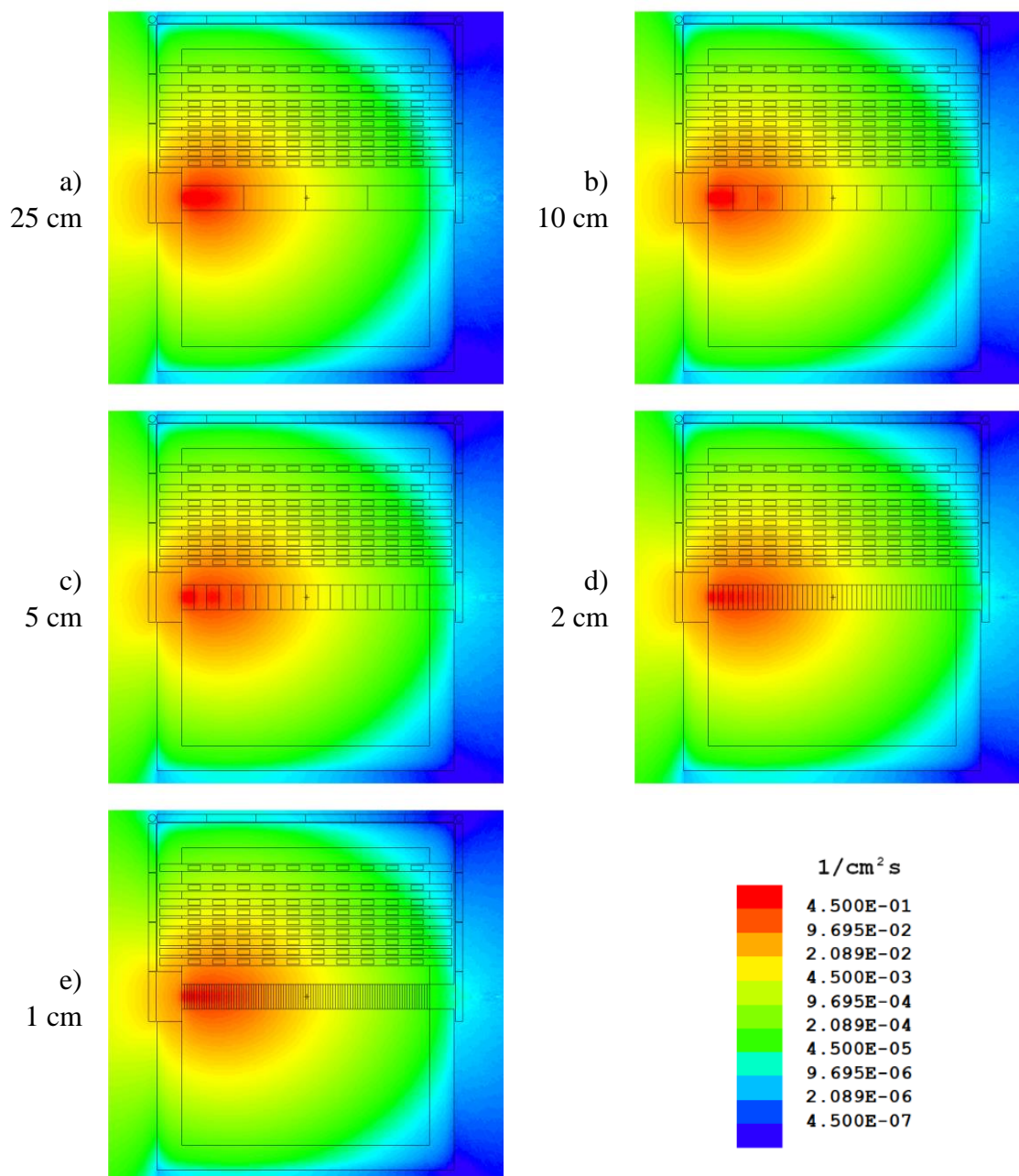


Obr. 49 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 52 cm od osy zařízení pro kombinované B/U terče s různou tloušťkou válců.

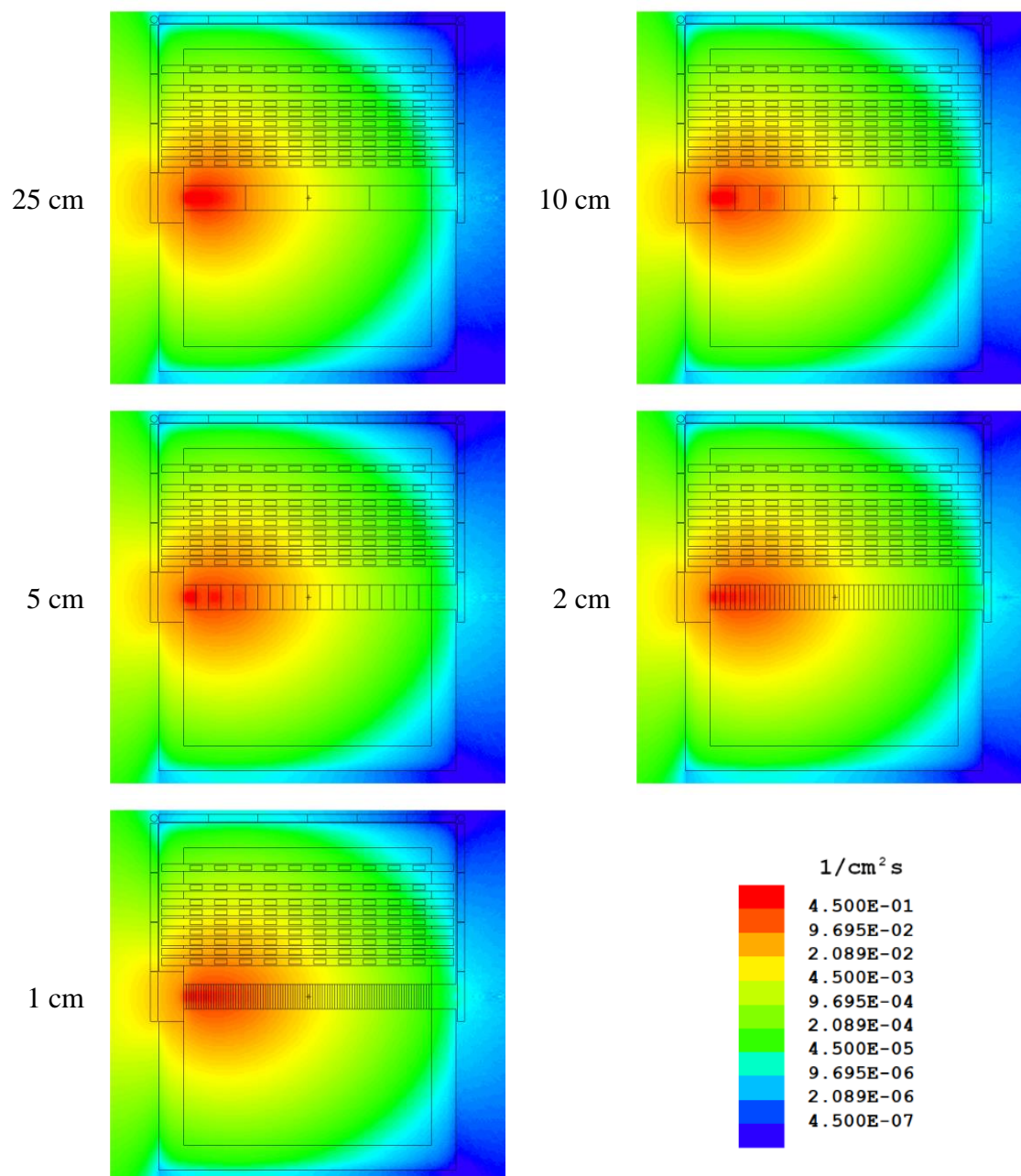


Obr. 50 Střední hustota neutronového toku na obvodu zařízení pro kombinované B/U terče s různou tloušťkou válců.

## Příloha D – Kombinované terče U/B

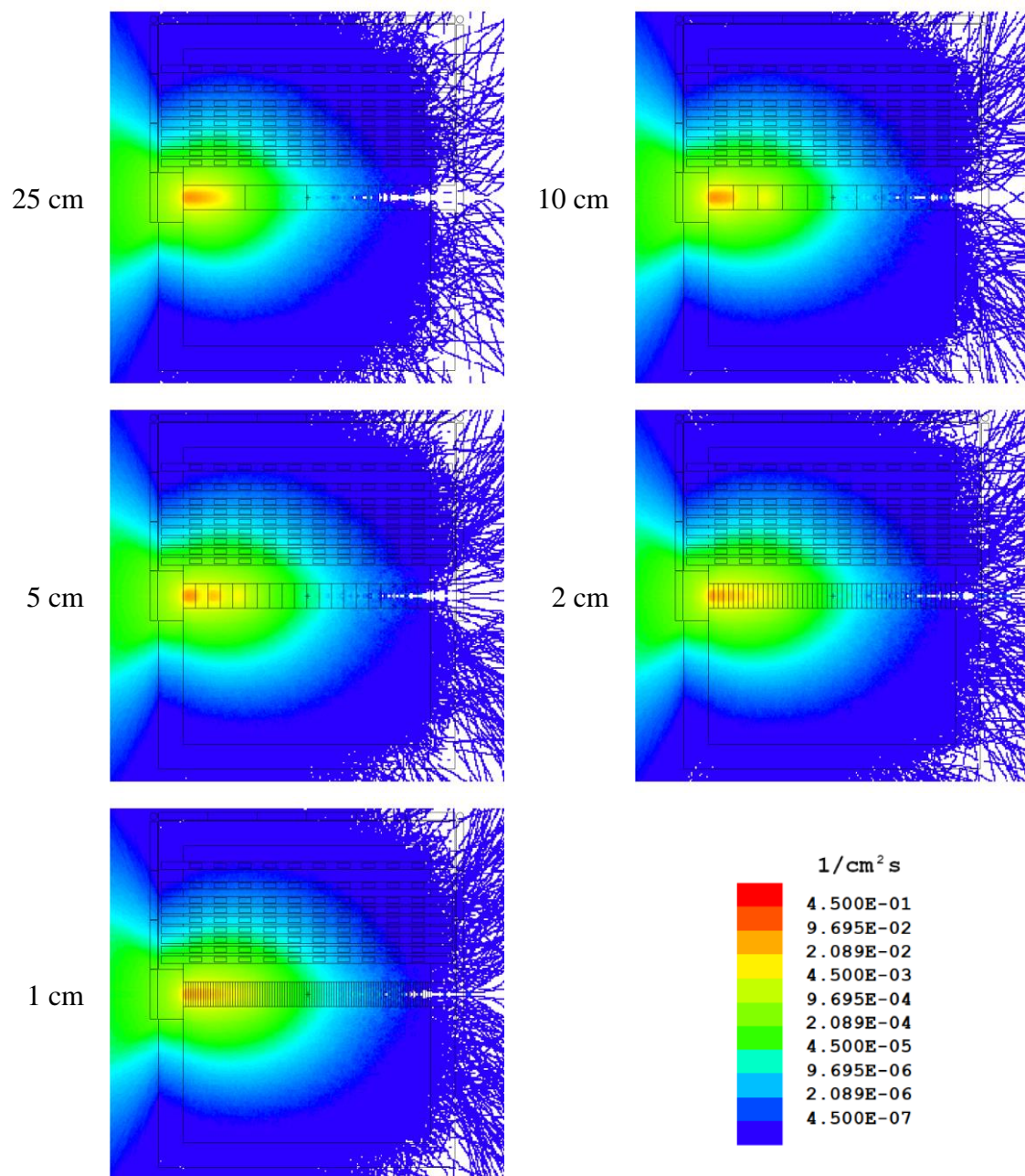


Obr. 51 a) – e) Hustota neutronového toku v celém neutronovém spektru při použití kombinace U/B s různou tloušťkou válců.

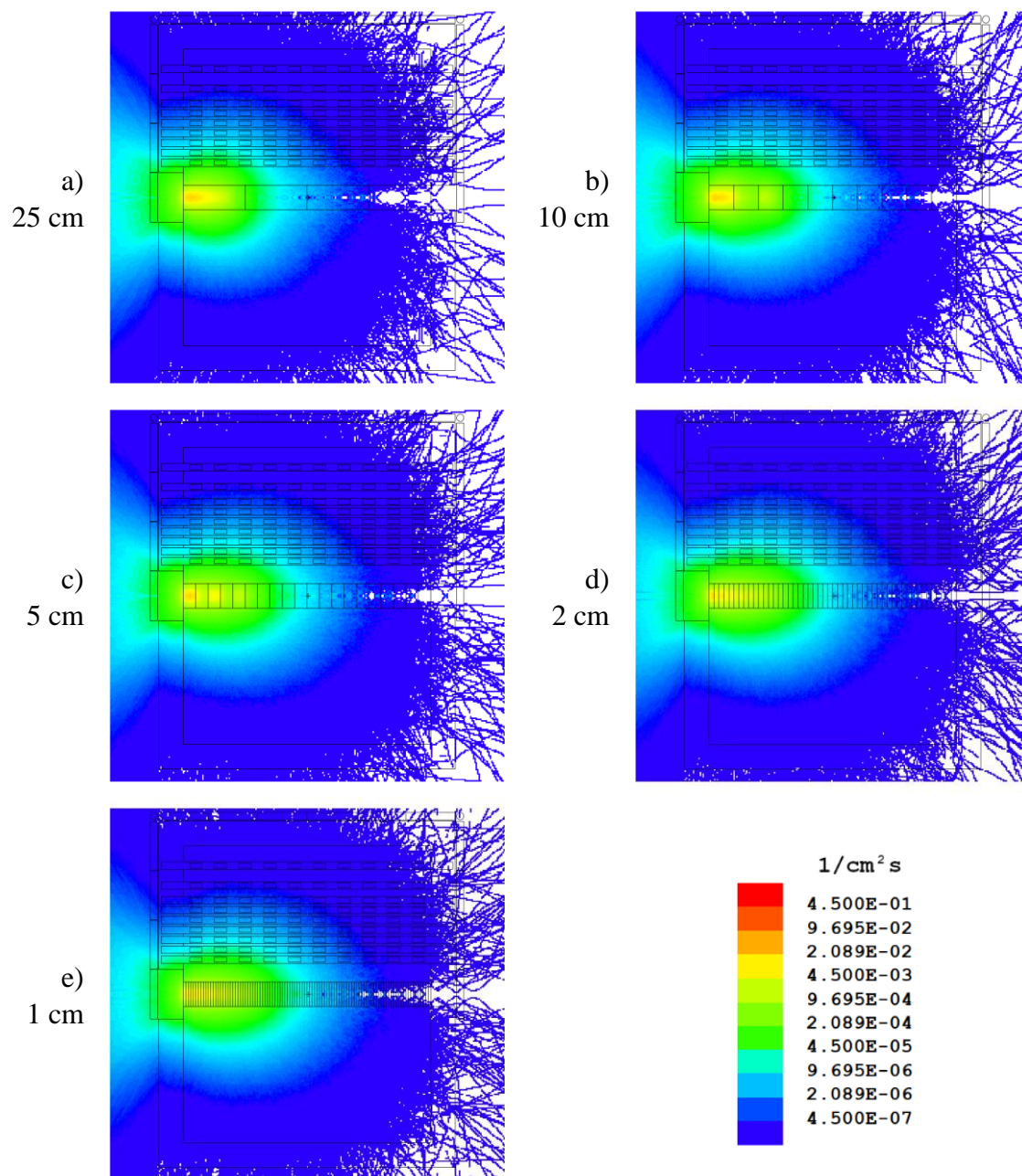


Obr. 52 a) – e) Hustota neutronového toku pro energie 0-7 MeV při použití kombinace U/B s různou tloušťkou válců.

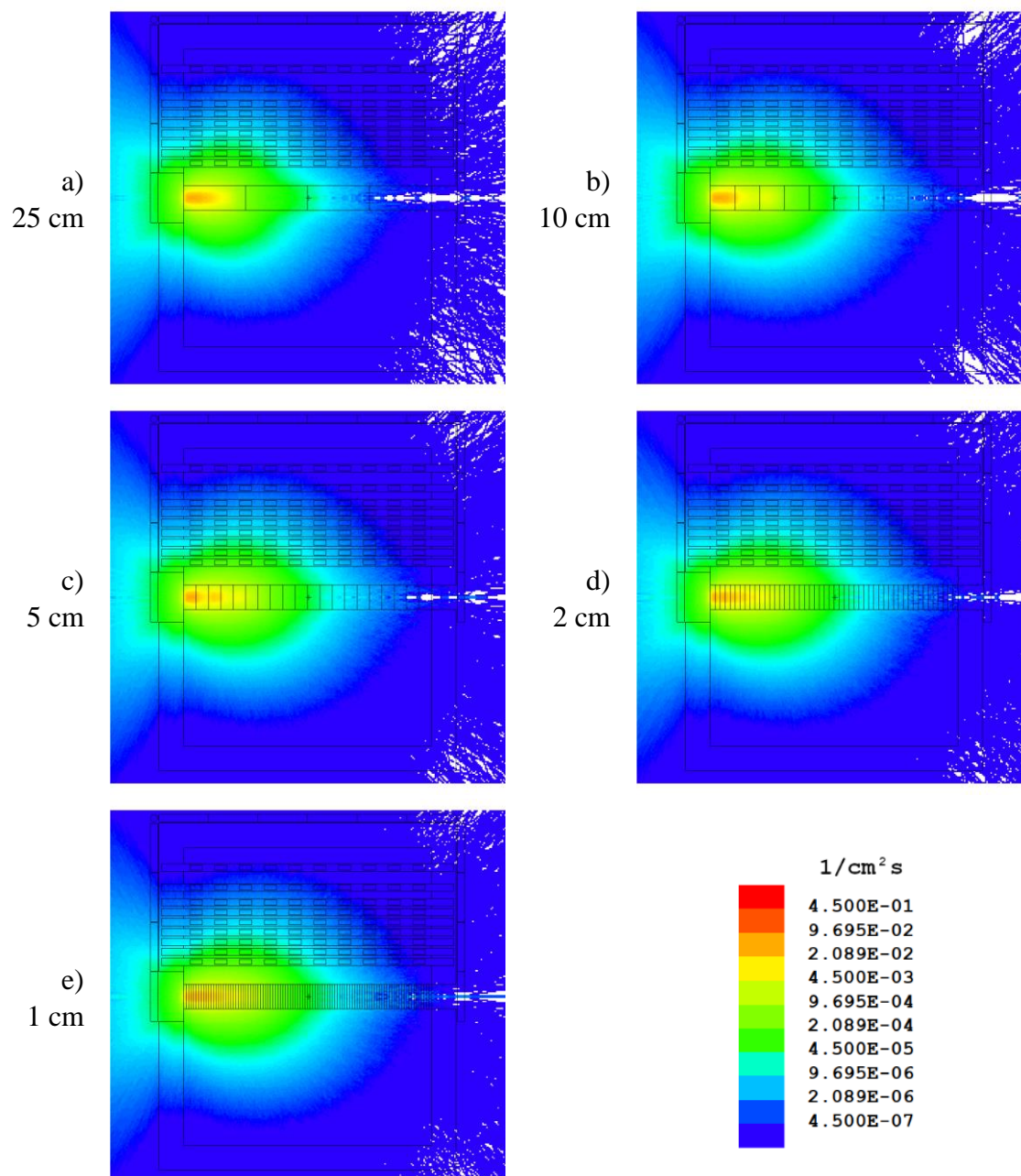




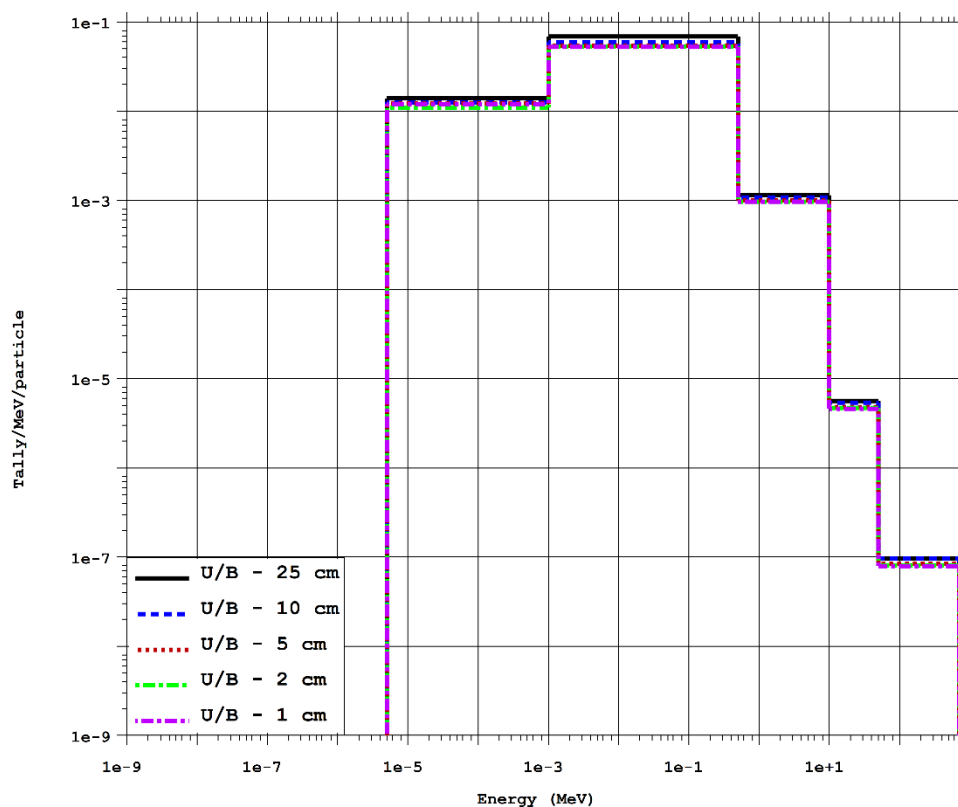
Obr. 53 a) – e) Hustota neutronového toku pro energie 7-15 MeV při použití kombinace U/B s různou tloušťkou válců.



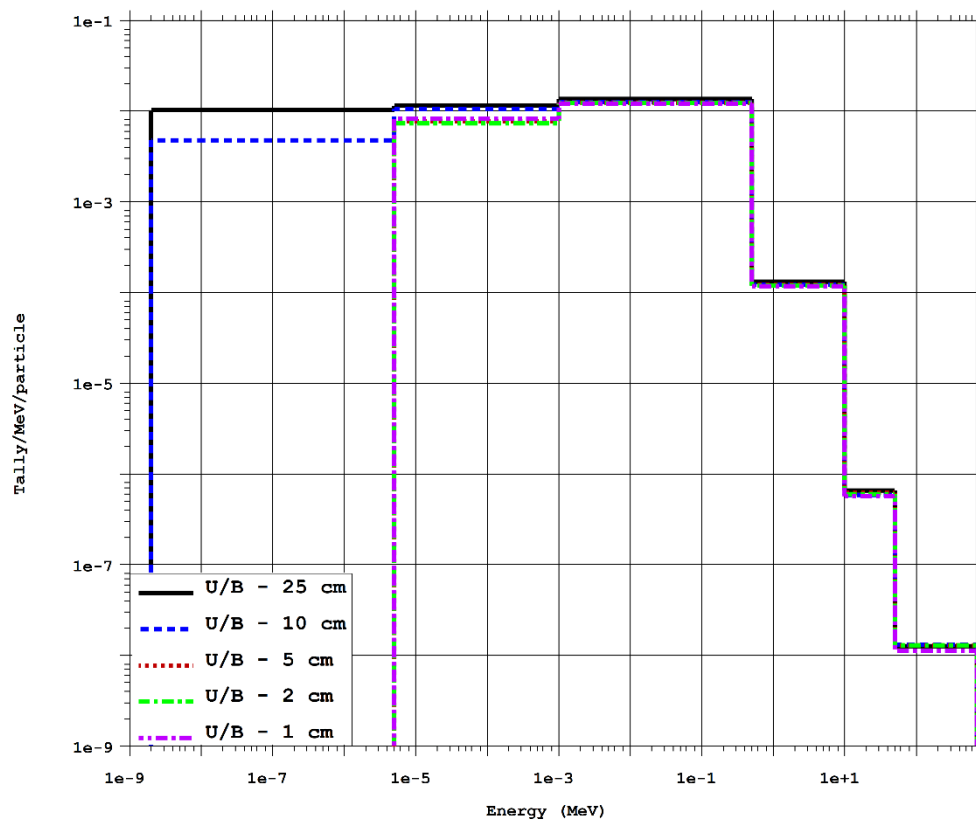
Obr. 54 a) – e) Hustota neutronového toku pro energie 15-25 MeV při použití kombinace U/B s různou tloušťkou válců.



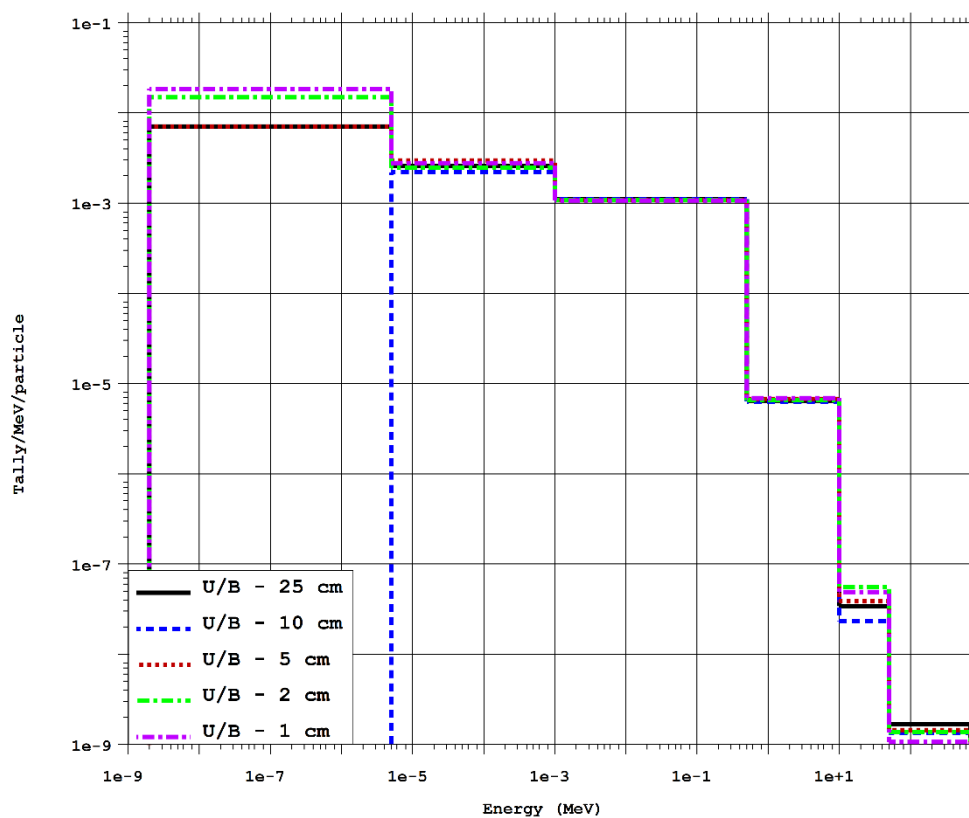
Obr. 55 a) – e) Hustota neutronového toku pro energie 25-700 MeV při použití kombinace U/B s různou tloušťkou válců.



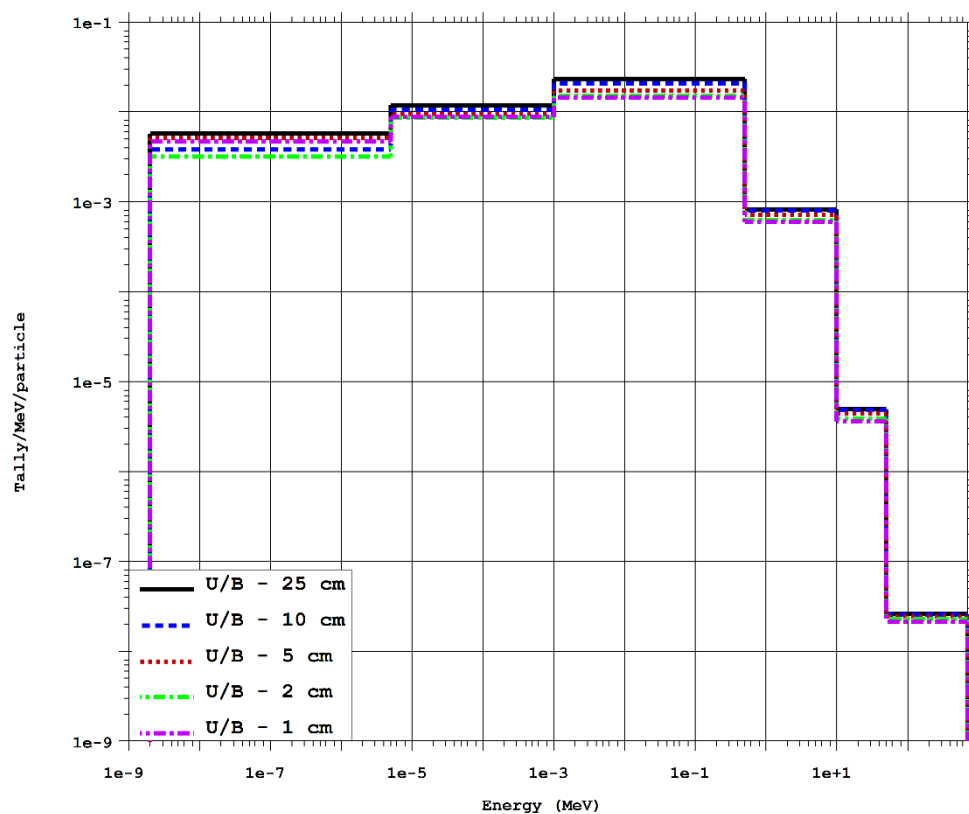
Obr. 56 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 14 cm od osy zařízení pro kombinované U/B terče s různou tloušťkou válců.



Obr. 57 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 30 cm od osy zařízení pro kombinované U/B terče s různou tloušťkou válců.



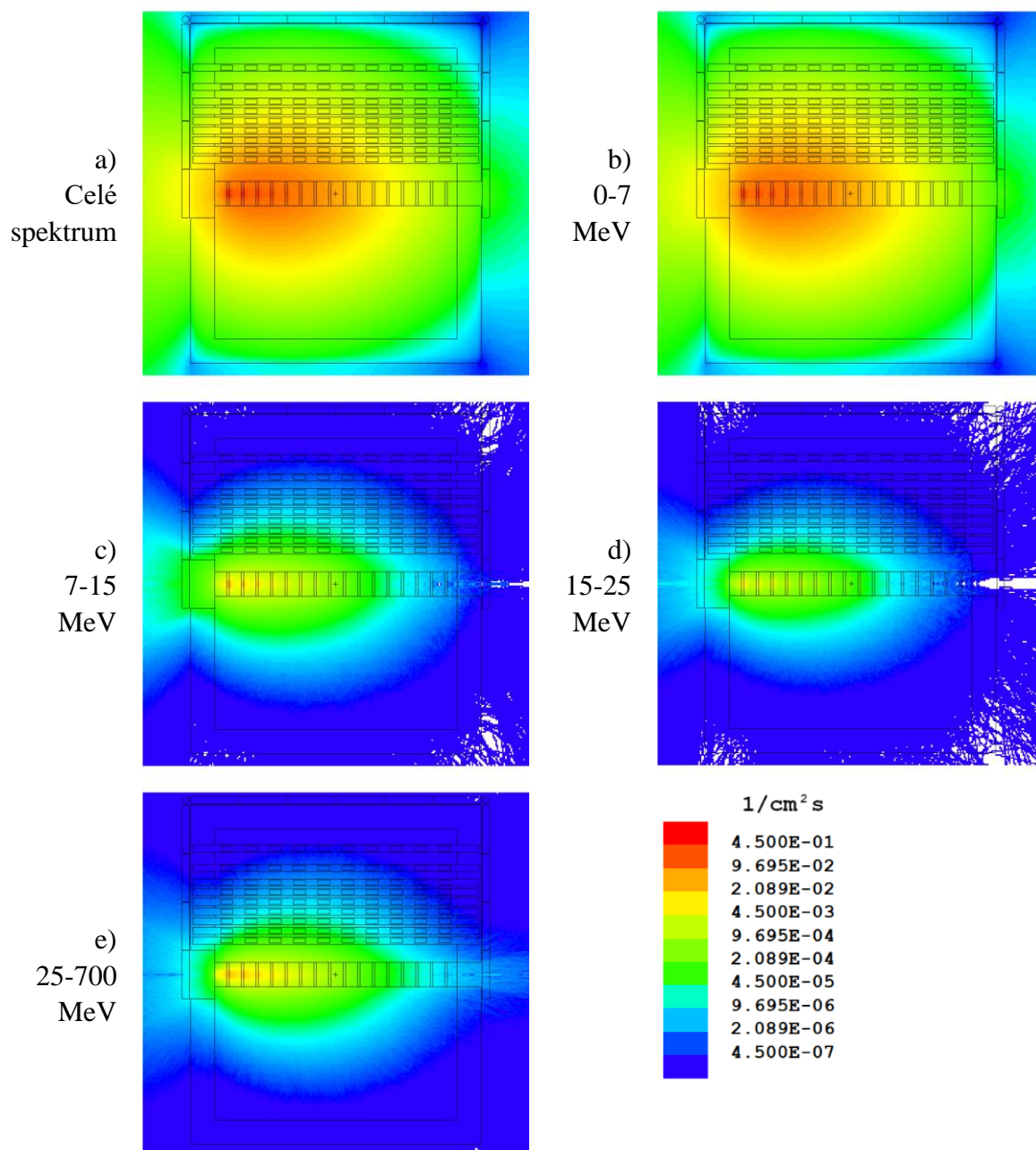
Obr. 58 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 52 od osy zařízení pro kombinované U/B terče s různou tloušťkou válců.



Obr. 59 Střední hustota neutronového toku na obvodu zařízení pro kombinované U/B terče s různou tloušťkou válců.

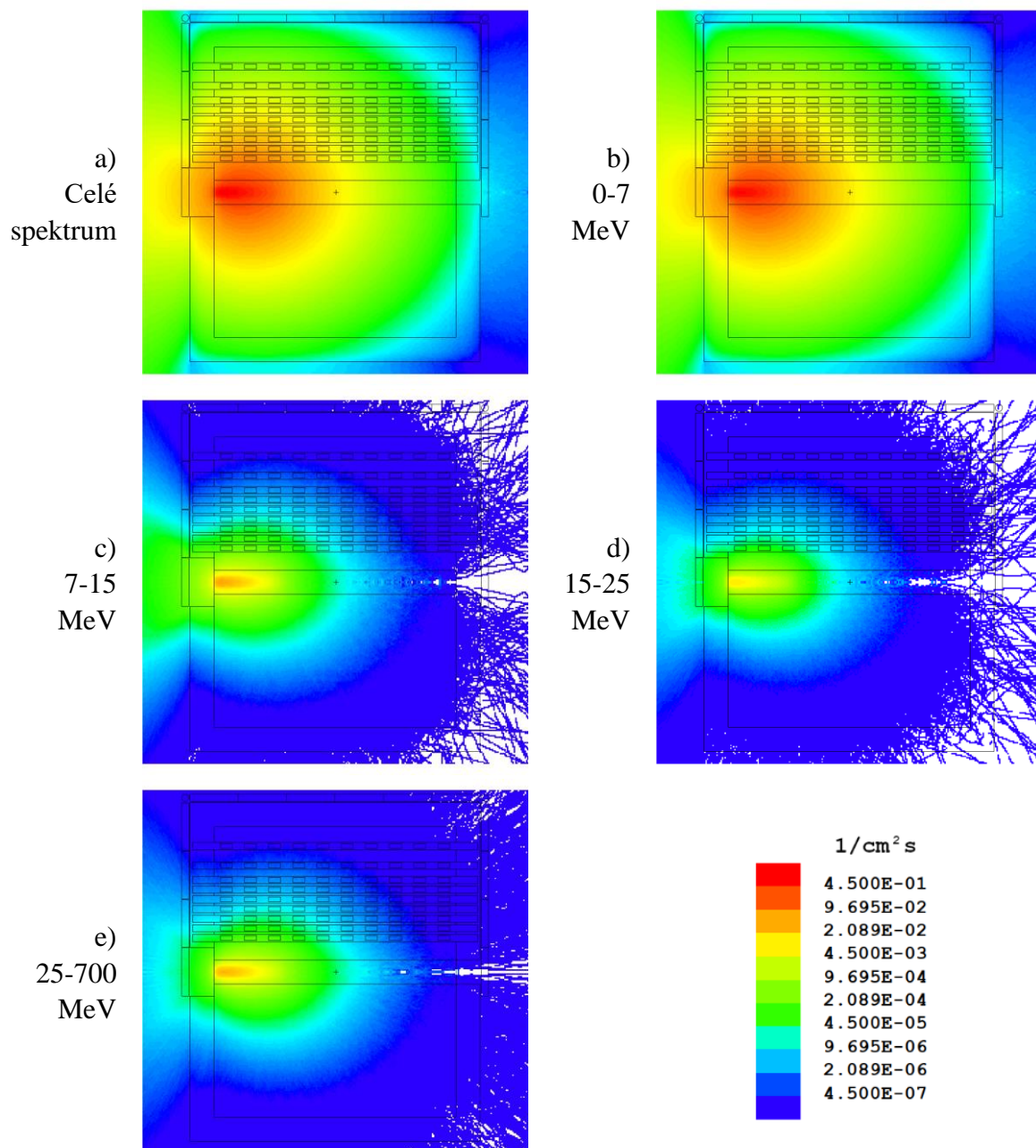


## Příloha E – Kombinovaný terč B/U 5/1



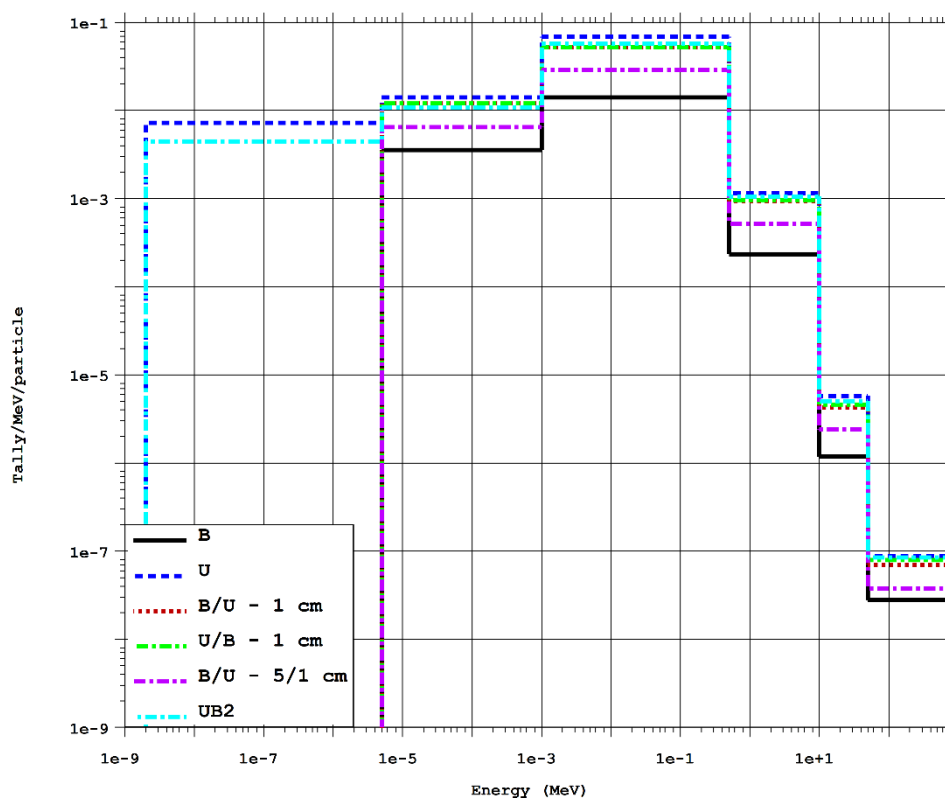
Obr. 60 a) – e) Hustota neutronového toku pro různé intervaly energií při použití kombinovaného terče B/U 5/1.

## Příloha F – Homogenní terč

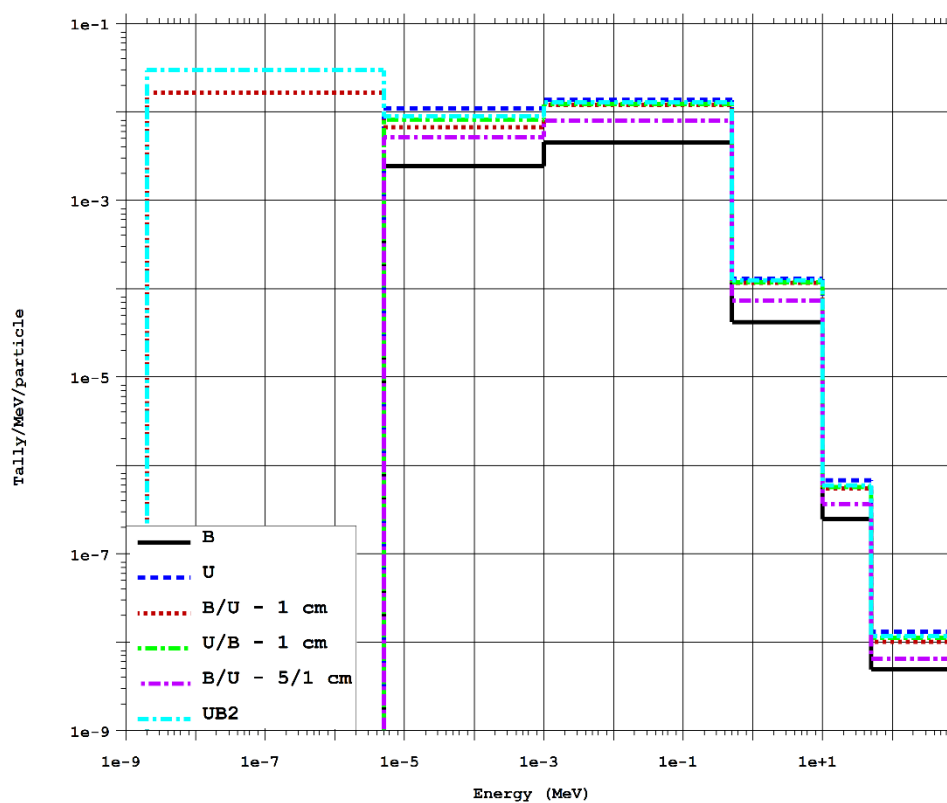


Obr. 61 a) – e) Hustota neutronového toku pro různé intervaly energií při použití kombinovaného terče  $UB_2$ .

## Příloha G – Porovnání

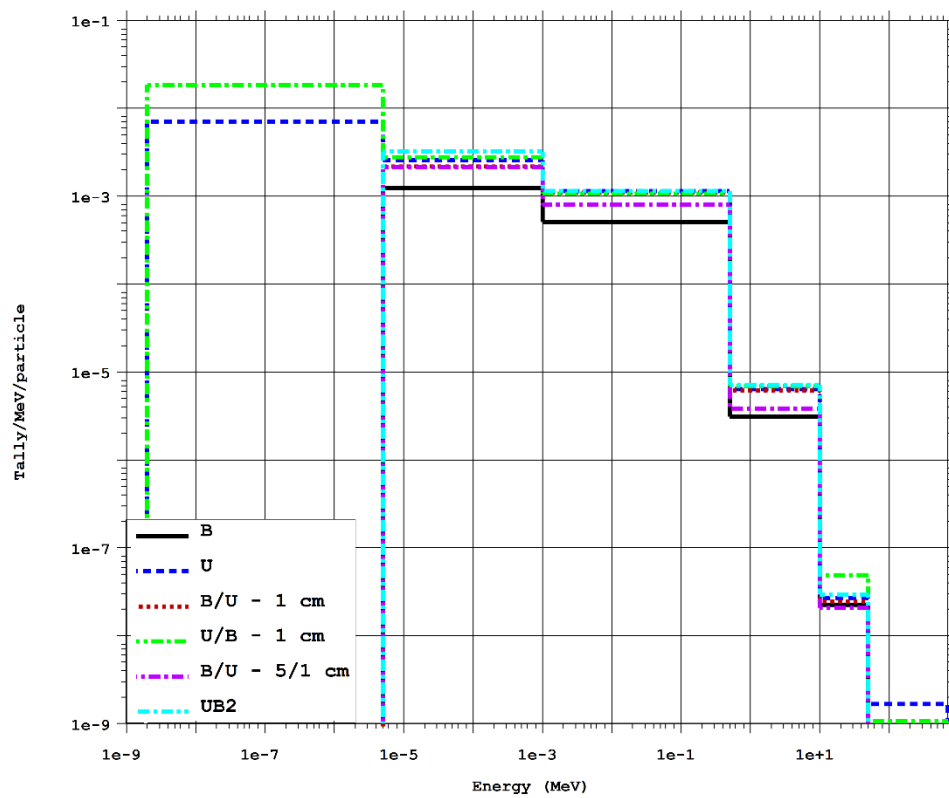


Obr. 62 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 14 cm od osy zařízení pro vybrané terče.

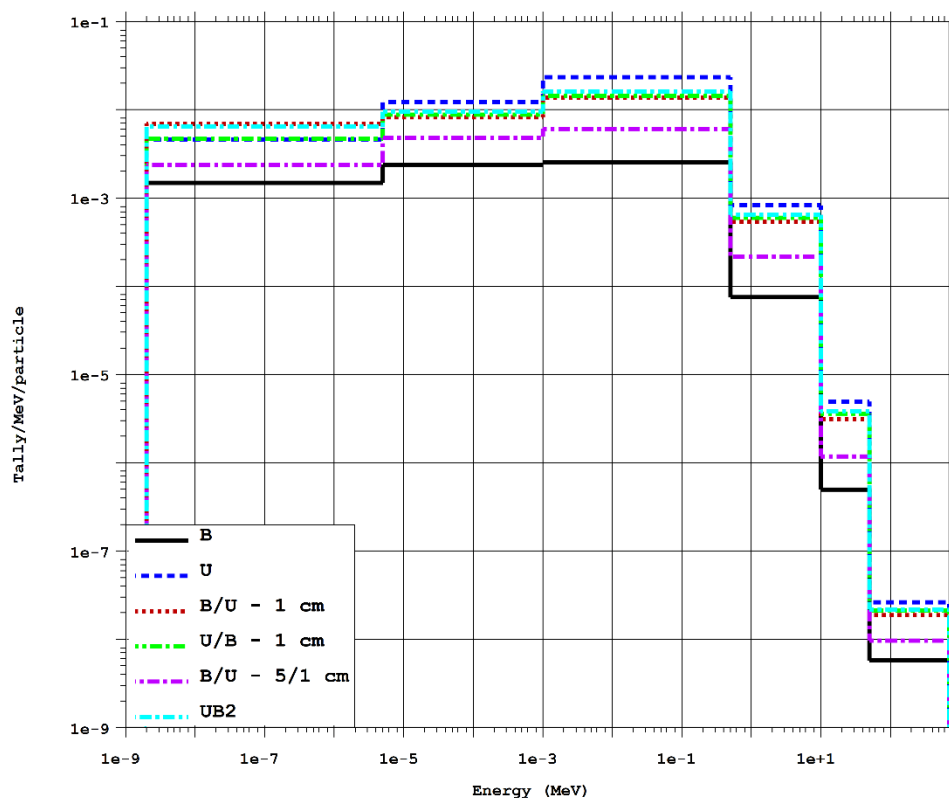


Obr. 63 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 30 cm od osy zařízení pro vybrané terče.





Obr. 64 Střední hustota neutronového toku v detektorech ve vzdálenosti 52 cm od osy zařízení pro vybrané terče.



Obr. 65 Střední hustota neutronového toku na obvodu zařízení pro vybrané terče.